



Научно-исследовательское учреждение  
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ  
ИМЕНИ А. Н. СЕВЧЕНКО»  
Белорусского государственного университета

# Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния

Материалы седьмой Международной  
научно-практической конференции



Минск, 18–19 мая 2023 г.

Министерство образования Республики Беларусь  
Белорусский государственный университет  
Научно-исследовательское учреждение  
«Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко»

Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики  
конденсированного состояния

Материалы VII Международной научно-практической конференции,  
посвященной 120-летию со дня рождения  
академика Антона Никифоровича Севченко  
Минск, 18-19 мая 2023 года

2-я редакция, дополненная

Минск  
2023

УДК 535(06)+004(06)+537.86(06)+538.9(06)  
П 759

Решение о депонировании вынес  
Ученый совет  
НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко»  
Белорусского государственного университета  
Протокол № 3 от 8 июня 2023 г.

Редакционная коллегия:  
заместитель директора по научной работе,  
кандидат физико-математических наук *Ю.И. Дудчик (гл. ред.)*,  
ученый секретарь, кандидат технических наук *И.М. Цикман*,  
младший научный сотрудник *И.Н. Кольчевская*

Рецензенты:  
доктор физ.-матем. наук, доцент, декан факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета *Д.В. Ушаков*;  
академик НАН Беларуси, доктор физ.-матем. наук, профессор, заведующий лабораторией специальных вычислительных систем НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета *А.Ф. Чернявский*

Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы VII Междунар. науч.-практ. конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академика Антона Никифоровича Севченко, 18–19 мая 2023 г., Минск / НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А.Н. Севченко» БГУ ; [редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.), И. М. Цикман, И. Н. Кольчевская]. – 2-я ред., доп. – Минск : 2023. – 476 с. : ил. – Библиогр. в тексте.

Сборник содержит материалы VII Международной научно-практической конференции по следующим научным направлениям: прикладные проблемы оптики и спектроскопии; прикладные проблемы информатики; прикладные проблемы радиофизики; прикладные проблемы физики конденсированного состояния; аэрокосмические технологии и технологии ДЗЗ.

## **СЕКЦИЯ 1.**

# **ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ И СПЕКТРОСКОПИИ**

УДК 535-3, 535.314

Астафьев А. Л., Воеводина М. А., Зверев Д. А., Снигирев А. А.

## ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ ДЕТЕКТОР ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

МНИЦ «Когерентная рентгеновская оптика», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

Описан разработанный высокоразрешающий 2-D рентгеновский детектор на основе LuAg сцинтиллятора и сенсора цифровой камеры.

Для получения изображений рентгеновского излучения наиболее распространенным методом является непрямой метод визуализации. Этот метод подразумевает использование цифровых камер и сцинтилляторов [1]. Суть метода заключается в преобразовании рентгеновского излучения с помощью сцинтиллятора в фотоны видимого света, которые затем передаются через оптическую систему на сенсор цифровой камеры.

Данный доклад посвящен разработанному высокоразрешающему 2-D рентгеновскому детектору на основе LuAg сцинтиллятора и сенсора цифровой камеры. Сцинтилляционный кристалл толщиной 20 мкм обладает высокой разрешающей способностью, малым послесвечением, что позволило добиться высокого разрешения. Монохромный CMOS сенсор с разрешением 20 МП позволяет производить снимки со скоростью до 19 fps при полном разрешении (5496×3672). Размер рабочей области детектора составляет 4,7×3,2 мм, при этом эффективный размер пикселя 0,8  $\mu\text{m}$ , при физическом размере 2,4  $\mu\text{m}$ .

Тестирование устройство проводилась на лабораторном источнике Excillum MetalJet D2 с жидким GaIn анодом. Апробация детектора проводилась на металлической сетке № 1000 с толщиной проволоки 10  $\mu\text{m}$ . Определение разрешающей способности осуществлялось с использованием периодической структуры Siemens star. Также, была проведена серия снимков на биологических объектах. На рисунке 1 представлены рентгеновские снимки вышеназванных тестовых объектов.

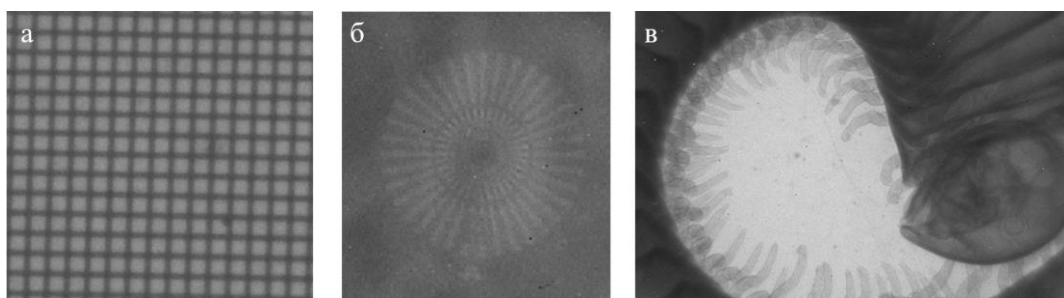


Рисунок 1 – Изображение различных объектов в рентгеновских лучах, полученных на детектор а) металлическая сетка, б) Siemens star, в) биологический объект (многоножка)

Изображение звезды Сименса (рис. 1б) показывает, что изготовленный рентгеновский детектор позволяет достигать пространственного разрешения порядка 1  $\mu\text{m}$ , а анализ изображений сетки свидетельствует о малых линейных искажениях полученных изображений (1% или менее). Детектор может быть использован как на лабораторных рентгеновских источниках, так и на синхротронных станциях, в т.ч. и на источниках IV поколения. Основным применением устройства может быть высокоразрешающий имиджинг, томография, топография, микроскопии, высокоразрешающей дифрактометрия, а также интроскопии (диагностика пучка, инструментария, положения объекта исследования).

### Список литературы

1. A. Koch, C. Raven, P. Spanne, A. Snigirev, J. Opt. Soc. Am. A., 1998, p. 1940 – 1951.

УДК 538.91

Тиванов М. С.<sup>1</sup>, Байко Д. С.<sup>1</sup>, Ляшенко Л. С.<sup>1</sup>,  
Разыков Т. М.<sup>2</sup>, Кучкаров К. М.<sup>2</sup>, Эргашев Б. А.<sup>2</sup>, Олимов А. Н.<sup>2</sup>

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $Sb_2(Se_{1-x}, S_x)_3$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

<sup>1</sup>Физический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Халькогениды сурьмы  $Sb_2(Se_{1-x}, S_x)_3$  в последнее время интенсивно исследуются в качестве светопоглощающего материала для применения в фотоэлектрических устройствах благодаря их простому, недорогому и нетоксичному составу, подходящей ширины запрещенной зоны и высокому оптическому поглощению в коротковолновой области [1]. В данной работе изучены оптические свойства тонких пленок твердых растворов  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$ , полученных методом химического молекулярного пучкового осаждения. Установлено изменение значений ширины запрещенной зоны в сторону более высоких энергий от 1,09 эВ до 1,65 эВ с увеличением содержания серы в синтезированных тонких пленках.

Одним из основных параметров, определяющих эффективность фотопреобразования, является ширина запрещенной зоны  $E_g$ . Теоретические расчеты показывают, что наиболее эффективными фотопреобразователями с одним переходом являются те, что в качестве базового слоя используют материал с  $E_g$  в пределах от 1.0 до 1.5 эВ [2]. Прямозонные полупроводники сульфид сурьмы ( $Sb_2S_3$ ) и селенид сурьмы ( $Sb_2Se_3$ ) с  $E_g$  1.5-1.8 эВ и 0.9-1.1 эВ, соответственно, образуют твердые растворы  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$  с  $E_g$  в границах этого интервала [3, 4]. Именно от пленок с оптимальным значением запрещенной зоны следует ожидать максимально возможной эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую.

В данном исследовании установлены электрические и оптические свойства тонких пленок твердых растворов  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$  синтезированных методом химического молекулярного пучкового осаждения (ХМПО) на подложке из натриевого стекла при различных соотношениях сульфида и селенида сурьмы в процессе синтеза. Соотношение компонентов синтезируемой пленки регулировалось количеством испаряемого вещества из источников  $Sb_2S_3$  и  $Sb_2Se_3$ .

Элементный (химический) состав синтезированных пленок определялся методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием энергодисперсионного безазотного спектрометра Aztec Energy Advanced X-Max 80. Содержание С (ат. %) химических элементов в образцах приведено в Таблице 1.

Таблица 1

Химический состав пленок  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$

Образец, N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
С, ат. %	Sb	40.22	40.38	40.53	39.9	39.81	39.76	39.93	39.45	38.92	40.76
	S	-	8.29	12.98	23.87	25.67	32.73	40.09	49.75	51.26	59.24
	Se	59.78	51.33	46.49	36.23	34.51	27.51	19.98	10.8	9.83	-
Sb/(S+Se)	<b>0.67</b>	<b>0.68</b>	<b>0.68</b>	<b>0.66</b>	<b>0.66</b>	<b>0.66</b>	<b>0.66</b>	<b>0.66</b>	<b>0.65</b>	<b>0.64</b>	<b>0.69</b>
S/(S+Se)	<b>0.00</b>	<b>0.14</b>	<b>0.22</b>	<b>0.40</b>	<b>0.43</b>	<b>0.53</b>	<b>0.67</b>	<b>0.82</b>	<b>0.84</b>	<b>1.00</b>	

Для синтеза тонких пленок использовались порошки высокой чистоты (99.999%) селенида сурьмы  $Sb_2Se_3$  и трисульфида сурьмы  $Sb_2S_3$ . В качестве подложки применялось содово-известковое стекло, температура которого при синтезе составляла 300 °С.

С использованием многофункционального сканирующего спектрофотометра PHOTON RT (EssentOptics) были определены зависимости коэффициента отражения (R) и коэффициента пропускания (T) от длины волны излучения ( $\lambda$ ) в диапазоне от 400 до 3000 нм в неполяризованном свете, представленные на Рисунке 1.

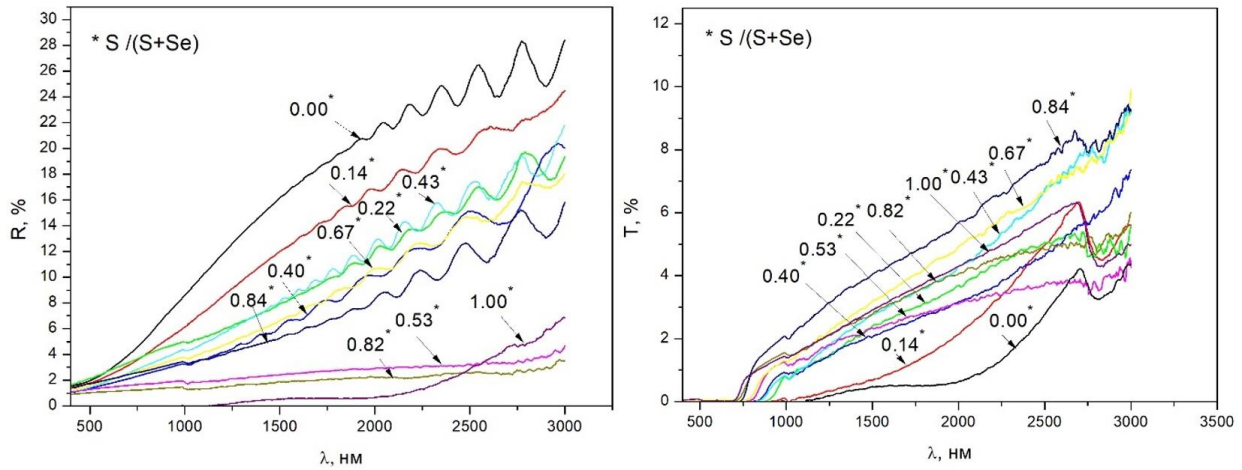


Рисунок 1 – Спектры отражения и пропускания тонких пленок  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$

Как видно из рисунка 1, тонкие пленки  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$  практически не пропускают световое излучение видимого диапазона. На спектрах отражения видны периодические пики и впадины, обусловленные интерференционными явлениями, что свидетельствует о высоком структурном совершенстве тонких пленок.

Коэффициент поглощения  $\alpha$  может быть рассчитан из измерений коэффициента отражения  $R$  и коэффициента пропускания  $T$  по формуле:

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \left( \frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right), \quad (1)$$

где  $t$  – толщина образца,  $R$  – коэффициент отражения,  $T$  – коэффициент пропускания.

Ширина запрещенной зоны исследуемых пленок  $E_g$  определялась экстраполяцией прямолинейного участка зависимости  $(\alpha h\nu)^2$  от энергии фотона  $h\nu$  до пересечения с осью абсцисс. Спектральные зависимости  $(\alpha h\nu)^2$  от  $h\nu$  для пленок  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$  и рассчитанные по ним значения ширины запрещенной зоны приведены на Рисунке 2. Зависимость значения ширины запрещенной зоны от элементного состава  $S/(S+Se)$  в тонких пленках представлена на Рисунке 3, сплошная кривая представляет собой квадратичную аппроксимацию измеренных значений энергии запрещенной зоны. Наблюдается рост значений ширины запрещенной зоны от 1,09 эВ для  $Sb_2Se_3$  до 1,65 эВ для  $Sb_2S_3$  по мере увеличения концентрации  $S$  в синтезируемых тонких пленках  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$ .

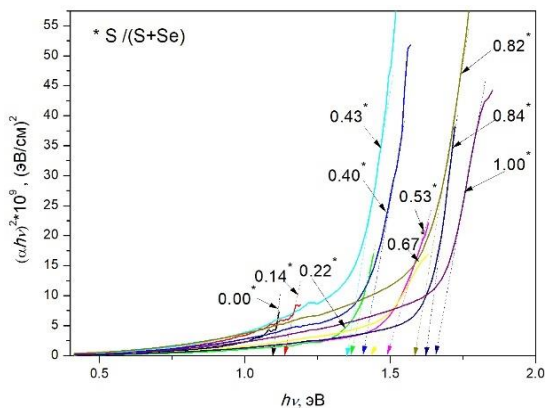


Рисунок 2 – Определение ширины запрещенной зоны пленок  $Sb_2(S_x, Se_{1-x})_3$

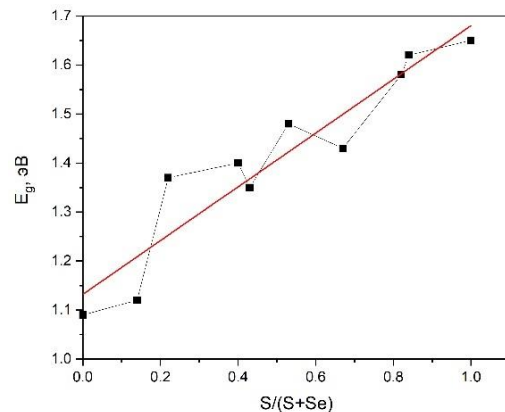


Рисунок 3 – Зависимость значения ширины запрещенной зоны от элементного состава  $S/(S+Se)$  в образцах

Энергия Урбаха  $E_U$  дает информацию о существовании локализованных состояний в области запрещенной зоны. Их наличие связано с ненасыщенными связями и/или дефектами в пленках. В области низких энергий фотонов ( $h\nu < E_g$ ) выполняется эмпирическое правило Урбаха [5]:

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[ \frac{hv}{E_U} \right], \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  - константа.

Значение  $E_U$  может быть получено по наклону линейной части кривой зависимости  $\ln(\alpha)$  от  $hv$ , как показано на Рисунке 4. Зависимость значения энергии Урбаха от элементного состава  $S/(S+Se)$  в тонких пленках представлена на Рисунке 5, сплошная кривая представляет собой квадратичную аппроксимацию измеренных значений энергии запрещенной зоны.

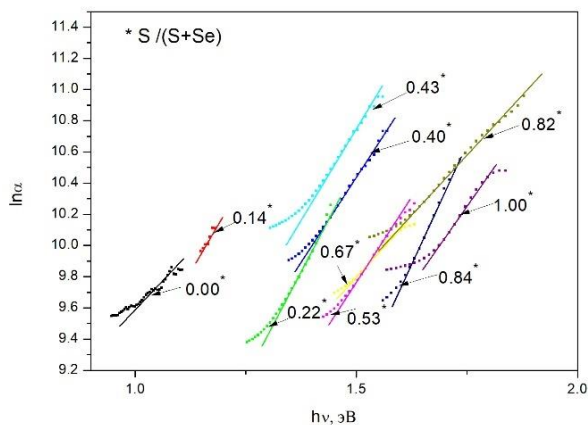


Рисунок 4 – Определение энергии Урбаха  $E_U$  пленок  $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$

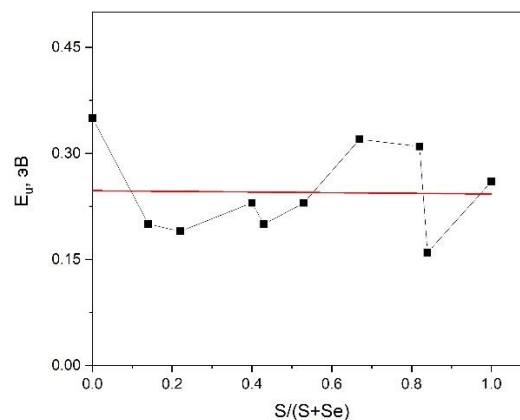


Рисунок 5 – Зависимость значения энергии Урбаха от элементного состава  $S/(S+Se)$  в образцах

Для всех образцов значения энергии Урбах  $E_U$  находятся в пределах от 0.16 эВ до 0.35 эВ, что свидетельствует о достаточно низкой дефектности пленок.

Методом химического молекулярного пучкового осаждения получены тонкие пленки твердых растворов  $Sb_2(S_x,Se_{1-x})_3$ . Установлено, что с увеличением доли серы монотонно возрастает ширина запрещенной зоны и синтезированные тонкие пленки, полученные при соотношениях  $S/(S+Se)$  равных 0.00, 0.14, 0.22, 0.40, 0.43, 0.53, 0.67, обладают шириной запрещенной зоны из наиболее эффективного промежутка от 1.0 до 1.5 эВ. Исследованные пленки обладают достаточно низкой дефектностью.

#### Список литературы

1. Y. Zhou et al. / Solution-processed antimony selenide heterojunction solar cells // Adv. Energy Mater. 4, 1301846 (2014).
2. A. Mavlonov, T. Razykov, F. Raziq et al. / A review of  $Sb_2Se_3$  photovoltaic absorber materials and thin-film solar cells // Solar Energy, V. 201, p. 227-246 (2020).
3. B. Yang et al. / Hydrazine solution processed  $Sb_2S_3$ ,  $Sb_2Se_3$  and  $Sb_2(S_{1-x}Se_x)_3$  film: molecular precursor identification, film fabrication and band gap tuning // Scientific Reports, V. 5, 10978 (2015).
4. R. Poerschke, O. Madelung / Semiconductors other than group IV elements and III-V compounds // Data in Science and Technology, SpringerVerlag, P. 49 (1992).
5. F. Urbach / The Long-Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids // Phys. Rev., V. 92. p. 1324 (1953).



## СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ КОЖИ И ПОДКОЖНЫХ ТКАНЕЙ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ИХ ГИДРАТАЦИЮ И ПАРАМЕТРЫ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Оценены возможности применения спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением при оценке состояния кожи и подкожных тканей. Приводятся особенности регистрации спектрально-пространственных профилей диффузного отражения светового излучения поверхностными тканями человека и перечень определяемых оптических свойств этих тканей, а также параметров их микроциркуляторного русла системы кровоснабжения, которые могут быть использованы для оценки гидратации, содержания крови, коллагена, меланина, каротинов, липидов и других хромофоров, а также эластичности кожи.

Существующие оптические методы (дерматоскопия, микрофотографирование, видео-дерматоскопия, когерентная томография, конфокальная микроскопия), которые используют при морфофункциональной диагностике состояния кожи [1, 2], в основном улучшают визуализацию структуры поверхностных тканей. Поэтому приходится использовать еще ряд других методов, позволяющих определять: влажность кожи (импедансный и емкостной методы), ее салоотделение или жирность (индикаторные полоски и фотометрия), объемное содержание меланина и уровня эритемы (фотометрия), температуры (термография) и т. д. Перспективным методом оценки состояния кожных покровов и подкожных тканей является диффузионная спектроскопия с пространственным разрешением, основанная на диффузионном приближении теории переноса излучения в рассеивающих средах [3].

В докладе рассматривается методика регистрации спектрально-пространственных профилей коэффициента локального отражения  $R(\lambda, \rho)$  светового излучения поверхностными тканями человека и результаты определения спектральных показателей приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$ , поглощения  $\mu_a(\lambda)$  ткани, а также гидратации, т. е. объемного содержания жидкой воды  $C_V^{H_2O}$ , параметров микроциркуляторного русла (объемной концентрации крови  $C_V^{bl}$ , эквивалентных диаметров внутреннего просвета малых артериальных  $D_a$  и венозных  $D_v$  сосудов, сатурации гемоглобина крови кислородом) и спектрального показателя обезкровенной и обезвоженной ткани  $\mu'_a(\lambda)$ , который необходим для дальнейшего определения объемной концентрации  $C_V$  основных хромофоров, присутствующих в коже и подкожной ткани. Показывается, что поверхностные ткани имеют сильную неоднородность, обусловленную существующим пространственным распределением малых артериальных и венозных сосудов, а также индивидуальными особенностями морфологии и состава тканей, что в свою очередь приводит к индивидуальному разбросу определяемых спектральных зависимостей  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$ . Приведены результаты экспериментального определения гидратации и параметров микроциркуляторного русла тканей руки человека.

Подробно обсуждается влияние концентрации крови  $C_V^{bl}$  в исследуемой точке ткани, а также объемной концентрации каротина и эквивалентных диаметров внутреннего просвета  $D_a$  и  $D_v$  и сатурации артериальной  $SaO_2$  и венозной  $SvO_2$  крови на цвет кожи. Указывается на различия спектров диффузного отражения, получаемых с помощью интегрирующей сферы или гиперспектральной камеры [4] и предлагаемой методикой на основе спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением. Отмечается наличие существенного влияния индивидуальных параметров форменных элементов крови на суммарный спектр поглощения крови, что приводит к существенному разбросу определяемых значений  $SvO_2$  даже при использовании параллельно определяемых значений сатурации артериальной крови  $SaO_2$ . Указывается, что для снижения влияния неоднородности распределения сосудов

необходимо проводить пространственное усреднение регистрируемых спектрально-пространственных профилей  $R_m(\lambda, \rho)$ .

Анализ полученных результатов показывает, что общую гидратацию  $C_V^{H_2O}$  ткани и кожных покровов можно определять в участке спектра от 490 нм до 1050 нм при условии учета объемных концентраций артериальной  $C_{Va}^{bl}$  и венозной  $C_{Vv}^{bl}$  крови, ее сатурации  $SaO_2$  и  $SvO_2$  и спектрального показателя условно обескровленной и обезвоженной ткани  $\mu'_a(\lambda)$ . Установлено, что ткани кисти руки имеют разброс измеренных значений  $C_V^{H_2O}$  от 60 % до 85 %. Указывается, что для определения гидратации эпидермиса кожи нужно использовать участок спектра  $\lambda > 1000$  нм, где расположены две сильные полосы поглощения  $H_2O$ , и оптоволоконные зонды типа «ромашка» с небольшими значениями расстояния  $\rho$  между излучающим оптоволоконном и окружающими его приемными оптоволоконками. Установлено, что ткани, имеющие слой подкожного жира, отличаются меньшими значениями гидратации  $C_V^{H_2O} < 50$  %, поскольку жир вытесняет воду, а также сильным поглощением светового излучения в коротковолновом диапазоне видимого спектра, что соответствует поглощению адипоцитов – жировых клеток бежевого цвета. Отмечается, что для уверенного определения концентрации липидов в подкожном слое надо использовать более длинноволновый участок спектра от 1050 до 1500 нм, в котором располагаются наиболее интенсивные полосы поглощения жиров.

Результаты определения спектральных показателей приведенного рассеяния живой ткани  $\mu'_s(\lambda)$  и поглощения условно обескровленной и обезвоженной ткани  $\mu'_a(\lambda)$  позволят также косвенным путем оценивать такой биомеханический параметр кожи, как ее эластичность или упругость, определяемая содержанием в том числе и коллагена, для измерения которого обычно применяются контактные методы.

Предлагаемая методика спектрального контроля состояния кожи и подкожных тканей является неинвазивной и оперативной, не требует дорогостоящего и громоздкого оборудования, что удобно при ее использовании в различных условиях. В частности, она может применяться на космических станциях в условиях невесомости для оценки деградации микроциркуляторного русла и состояния кожных покровов в условиях невесомости. При этом для повышения информативности аппаратуры, создаваемой для контроля состояния кожи и подкожных тканей человека, пребывающего в условиях длительной невесомости, необходимо комплексировать обсуждаемый метод с методом исследований, основанном на применении гиперспектральных камер и нейронных сетей [4], что позволит разделить искомые параметры поверхностных тканей по глубине, т. е. определять параметры как для тонкого верхнего слоя кожи (менее 1 мм), так и более глубоких (до 2-3 мм) подкожных слоев.

#### Список литературы

1. Безуглый, А. П. Современная диагностика кожи и доказательная косметология / А. П. Безуглый, О. В. Жукова, В. В. Петунина // Клиническая дерматология и венерология. – 2010. – Том 8, № 5. – С. 110–112.
2. Золотенкова, Г. В. Современные неинвазивные методы оценки возрастных изменений кожи / Г. В. Золотенкова, С. Б. Ткаченко, Ю. И. Пиголкин // Судебно-медицинская экспертиза. – 2015. – № 1. – С. 26–30.
3. Doornbos, R. The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy / R. Doornbos, R. Lang, M. Aadlers, [et al.] // Physics in Medicine and Biology. – 1999. – Vol. 44, No 4. – P. 967–981.
4. Zherebtsov, E. Hyperspectral imaging of human skin aided by artificial neural networks / E. Zherebtsov, V. Dremin, A. Popov, [et al.] // Biomedical optics express. – 2019. – Vol. 10, No 7. – P. 3545-3559.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛАСТИЧНОСТИ СОСУДОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Исследована применимость диффузной спектроскопии с временным и пространственным разрешением для оценки эластичности сосудов микроциркуляторного русла. Предложена и апробирована методика определения эластичности малых артериальных сосудов, основанная на регистрации и анализе спектрально-временного и спектрально-пространственного профилей диффузного отражения светового излучения живой кровенаполненной тканью.

При прохождении светового излучения через кровенаполненную пульсирующую живую ткань ее можно рассматривать как сильно рассеивающую неоднородную среду, в которой наблюдаются периодические изменения объема артериальной крови при приеме очередной порции крови от сердца. Артериальный бассейн кровеносного русла обладает определенной эластичностью сосудов и при приеме новой порции крови их стенки растягиваются, давление в них повышается, что обеспечивает за счет наблюдающейся разности давлений постоянную прокачку крови через все кровеносное русло [1], так как давление в полой вене небольшое и не превышает 6 мм рт. ст. Сопротивление току крови, оказываемое малыми сосудами артериального бассейна (мелкие артерии, артериолы, прекапилляры, капилляры, прекапиллярные сфинктеры и сфинктеры магистральных капилляров) составляет примерно 50–60 % от общего сопротивления сосудов кровотоку, поэтому их тонус прямо влияет на диастолическое артериальное давление, поддерживая его на определенном уровне. В норме наблюдается постепенное падение давления крови при переходе от крупных артериальных сосудов (примерно 100 мм рт. ст.) к малым, достигая значения примерно 30–15 мм рт. ст. в артериолах, прекапиллярах и капиллярах. Объем крови, находящейся в сосудах венозного русла, составляет примерно 70 % от объема всей крови в организме [2], поэтому площадь поперечного сечения венозных сосудов больше сечения артериальных, чтобы обеспечить постоянный кровоток при низком перепаде давления в венозном бассейне.

Пульсирующие изменения поперечного сечения артериальных сосудов используют в клинической практике для определения сатурации гемоглобина артериальной крови кислородом ( $\text{SaO}_2$ ) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) с помощью двухволновых пульсоксиметров. В медицине эластичность артериальных сосудов определяют по электрокардиограмме, которая косвенно отражает тонус крупных артериальных сосудов. Также возможны варианты исследований эластичности крупных сосудов с помощью ультразвуковых методов. Однако они неприменимы при прогнозе вероятности инсультов, который должен основываться в том числе и на определении эластичности малых сосудов артериального бассейна микроциркуляторного русла. Очевидно, что ультразвуковые методы к ним неприменимы из-за небольшого диаметра внутреннего просвета  $D_{va}$  этих сосудов (меньше 50 мкм) и небольшой амплитуды колебаний  $D_{va}$  при сердечных сокращениях по сравнению с используемой длиной волны звуковых колебаний  $\lambda_{\text{ук}}$  (при частоте звука  $f = 10$  МГц длина волны в теле человека  $\lambda_{\text{ук}} = 150$  мкм) [3].

При наличии метода определения усредненного эффективного диаметра внутреннего просвета малых артериальных сосудов  $\bar{D}_{va}$  микроциркуляторного русла сердечно-сосудистой системы и амплитуды их колебаний  $\Delta D_{va}$  возможно введение в диагностическую практику косвенного показателя эластичности малых артериальных сосудов в виде отношения  $k_{va}^{\text{el}} = \Delta D_{va} / \bar{D}_{va}$ . Действительно, по фотоплетизмограмме врач может неинвазивно *in vivo* оценить некоторые показатели работы сердца (ЧСС и статистику ее регулярности) и микро-

циркуляторного русла кровеносной системы (SaO<sub>2</sub>, состояние стенок малых артериальных сосудов на пальцах конечностей, амплитуду наблюдаемых колебаний и т. д.). В литературе практически отсутствуют сведения о методах и аппаратуре для определения диаметра внутреннего просвета малых артериальных сосудов, которые не доступны для непосредственного наблюдения, т. е. находящихся в глубине тканей, которые сильно рассеивают световое излучение. Можно найти работы по оценке диаметра видимых сосудов бульбарной конъюнктивы глаза или сосудов глазного дна и даже их распределения по размерам [4], но сведения об оценке диаметра внутреннего просвета  $\bar{D}_{va}$  невидимых малых сосудов даже в статьях, посвященных исследованиям параметров микроциркуляторного русла [5], отсутствуют.

Регистрация спектрально-пространственных профилей  $R(\lambda, \rho)$  диффузного отражения живых тканей в широком участке спектра от 490 нм до 1100 нм позволяет при использовании диффузионного приближения теории переноса светового излучения в рассеивающих средах определять спектральные показатели приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda) = (1 - g)\mu_s(\lambda)$ , где  $\mu_s$  – показатель рассеяния, а  $g$  – средний косинус угла рассеяния, в среднем равный 0,8 для биотканей, и поглощения  $\mu_a(\lambda)$  излучения этими тканями.

Подробно используемый способ их определения приведен в [6]. Формируя упрощенную модель диффузного отражения светового излучения живой тканью на основе разделения микроциркуляторного русла на два бассейна (артериальный и венозный) и используя полученную зависимость  $\mu_a(\lambda)$  и спектральные показатели поглощения оксигенированного HbO<sub>2</sub> и неоксигенированного Hb гемоглобинов, а также жидкой воды H<sub>2</sub>O и других хромофоров можно определять основные параметры микроциркуляторного русла: объемную концентрацию крови  $C_V^{bl}$  и ее артериальной  $C_{Va}^{bl}$  и венозной  $C_{Vv}^{bl}$  составляющих, эквивалентные диаметры внутреннего просвета малых артериальных  $\bar{D}_{va}$  и венозных  $\bar{D}_{vv}$  сосудов, а также среднюю сатурацию гемоглобина крови SavO<sub>2</sub>. В докладе обсуждаются особенности метода расчета значений  $\bar{D}_{va}$  и  $\bar{D}_{vv}$ , основанного на использовании различий поведения показателей поглощения HbO<sub>2</sub> и Hb в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Величина колебаний площади сечения артериальных сосудов определяет амплитуду колебаний спектрально-временного профиля диффузного отражения  $R(\lambda, \rho_0, t)$  ткани. В докладе оценивается значения  $\Delta\bar{D}_{va}$  по отношению амплитуды колебаний  $R(\lambda, \rho_0, t)$  в видимом участке спектра к части его постоянной составляющей, определяемой поглощением светового излучения, вводимого в ткань, только артериальными сосудами.

#### Список литературы

1. Magder, S. Volume and its relationship to cardiac output and venous return // Critical Care – 2016 – V 20(1), P. 271. doi: 10.1186/s13054-016-1438-7
2. Кузьков В. В., Киров М. Ю. Инвазивный мониторинг гемодинамики в интенсивной терапии и анестезиологии: монография. – Архангельск: Северный государственный медицинский университет, 2008. – 244 с.
3. Резников, И. И. Физические основы использования ультразвука в медицине / И. И. Резников, В.Н. Фёдорова, Е.В. Фаустов и др. – М., 2015. – 97 с.
4. Фираго, В. А. Методика определения диаметра и площади внутреннего просвета видимых сосудов глаза /В. А. Фираго.//Приборы и методы измерений. 2019. – Т. 10, № 2, – С. 185–197.
5. Doornbos, R. The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy // Physics in Medicine and Biology – 1999. – Vol. 44, No 4. – P. 967–981.
6. Фираго В. А., Шулико К. И. Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления. Положительное решение о выдаче евразийского патента по евразийской заявке № 202292115 на изобретение от 30 июня 2022 г., принятое 15.03.2023 г.

УДК 535.34+541.13

Белько Н. В.<sup>1</sup>, Мальтанова А. М.<sup>2</sup>, Луговский А. П.<sup>1</sup>, Гурский А. Л.<sup>1</sup>,  
Позняк С. К.<sup>2</sup>, Самцов М. П.<sup>1</sup>

## ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕНСОРА НА ОСНОВЕ СПИРОЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДНОГО РОДАМИНА Б

<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь

Исследованы электрохимические превращения гидразида родамина Б при помощи комбинации спектроскопии электронного поглощения, циклической вольтамперометрии и хроноамперометрии. Показано, что лимитирующей стадией процесса электроокисления гидразида родамина Б является диффузия молекул красителя к поверхности электрода. Установлено, что в результате электроокисления при 0,9 В (относительно насыщенного каломельного электрода) образуются продукты с полосами поглощения при 435, 559 и 702 нм. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения гидразида родамина Б в качестве флуоресцентного сенсора электрического потенциала.

Электрохимические методы являются эффективным инструментом исследования органических флуорофоров. Циклическая вольтамперометрия является наиболее простым экспериментальным методом определения окислительно-восстановительных потенциалов органических молекул, на основании которых могут быть рассчитаны уровни энергии молекулярных орбиталей [1]. Спектроэлектрохимия позволяет одновременно исследовать как процессы электрохимических превращений, так и их продукты [2].

Спироциклические родамины перспективны для создания флуоресцентных сенсоров, которые демонстрируют включение флуоресценции в ответ на присутствие различных химических веществ [3], электрический потенциал [4] или оптическое излучение [5]. К часто применяемым спироциклическим соединениям относят гидразид родамина Б (ГРБ) и его производные [3]. В данной работе исследуются превращения ГРБ (структурная формула данного соединения представлена на Рисунке 1) в процессе электроокисления при помощи комбинации электрохимических методов и спектроскопии электронного поглощения.

В качестве фонового электролита для электрохимических измерений использовали раствор тетрабутиламмония тетрафторбората концентрации 0,1 М в ацетонитриле. Деаэрирование исследуемых растворов производилось путем многократного (25 раз) вакуумирования электрохимической ячейки с последующим ее наполнением аргоном. В процессе измерений внутри ячейки поддерживалось избыточное давление аргона для исключения контакта растворов с кислородом. Для измерения спектров электронного поглощения растворы подавали по тефлоновым трубкам в проточную кварцевую кювету в бескислородных условиях. Исследование электрохимических превращений ГРБ в деаэрированных ацетонитрильных растворах обеспечивает контролируемые условия, а также исключает эффекты взаимодействия с кислородом и реактивными интермедиатами, которые могут образовываться в водных электролитах [7]. Далее все потенциалы даны относительно насыщенного каломельного электрода.

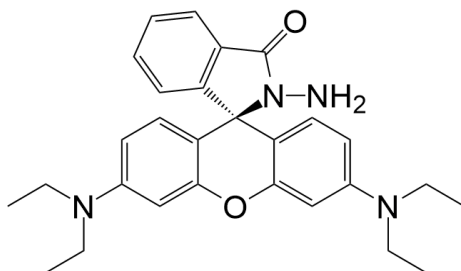


Рисунок 1 – Структурная формула ГРБ.

В анодных циклических вольтаммограммах для ГРБ, зарегистрированных при скорости развертки 100 мВ/с, проявляются две волны электроокисления с пиками при 0,83 и 0,95 В. При увеличении скорости развертки волны окисления становятся более интенсивными и смещаются в сторону более положительных потенциалов. Сопряженные волны восстановления не проявляются даже при скорости развертки 1 В/с, что свидетельствует о быстрых превращениях, образующихся при окислении интермедиатов. Поскольку амплитуды волн окисления линейно зависят от квадратного корня из скорости развертки, лимитирующей стадией окислительного процесса можно считать диффузию молекул ГРБ к электродной поверхности.

Раствор ГРБ в фоновом электролите не обладает электронным поглощением в видимой области. При приложении потенциала 0,9 В в спектре поглощения проявляются полосы при 435, 559 и 702 нм (Рисунок 2, а). Интенсивность этих постепенно растет со временем и выходит на постоянное значение спустя ~60 мин (Рисунок 2, б). После прекращения поляризации форма спектров поглощения не изменяется в течение длительного времени.

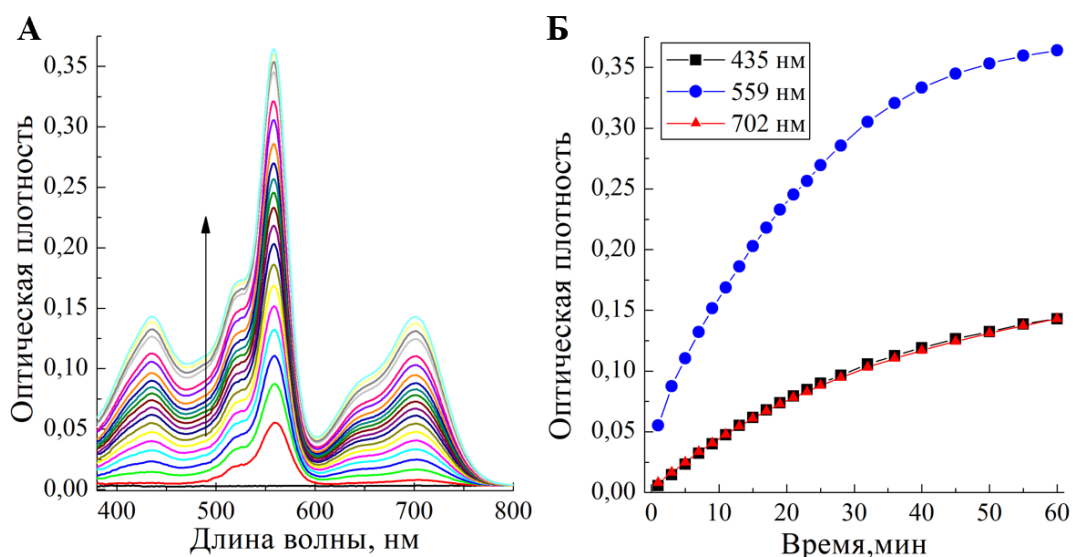


Рисунок 2 – Изменение спектра поглощения (А) и оптической плотности в основных максимумах поглощения (Б) раствора ГРБ концентрации 0,1 мМ в фоновом электролите в процессе электролиза при 0,9 В.

Таким образом, в результате электроокисления ГРБ при 0,9 В образуется ряд продуктов с поглощением в широком спектральном диапазоне, включая ближнюю ИК область. Длинноволновая полоса поглощения продуктов электроокисления ГРБ расположена в области прозрачности биологических тканей, что указывает на возможность применения красителя в качестве биосенсора электрического потенциала.

Данная работа выполнена при поддержке ГПНИ «Конвергенция – 2025» (задание 3.03.6) и проекта БРФФИ № X21M-073.

#### Список литературы

1. Structure and redox properties of polymethine dyes: Electrochemical and DFT/TD-DFT study / A. V. Kulinich [et al.] // *Dyes Pigment.* – 2019. – Vol. 161. – P. 24–33.
2. Kaim, W. Spectroelectrochemistry: the best of two worlds / W. Kaim, J. Fiedler // *Chem. Soc. Rev.* – 2009. – Vol. 38, №. 12. – P. 3373–3382.
3. A new trend in rhodamine-based chemosensors: application of spirolactam ring-opening to sensing ions / H. N. Kim [et al.] // *Chem. Soc. Rev.* – 2008. – Vol. 37, №. 8. – P. 1465–1472.
4. Reversible bond/cation-coupled electron transfer on phenylenediamine-based rhodamine B and its application on electrochromism / X. Wang [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2017. – Vol. 9, №. 23. – P. 20196–20204.
5. Rhodamines N. N: a novel class of caged fluorescent dyes / V.N. Belov [et al.] // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2010. – Vol. 49, №. 20. – P. 3520–3523.

УДК 535.34+541.14

Белько Н. В.<sup>1</sup>, Мальтанова А. М.<sup>2</sup>, Луговский А. П.<sup>1</sup>, Позняк С. К.<sup>2</sup>, Самцов М. П.<sup>1</sup>

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНА В МОЛЕКУЛАХ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение Белорусского государственного университета «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь

Исследованы процессы фотохимических превращений индотрикарбоцианиновых красителей с *мезо*-хлоридом и *о*-фениленовым мостиком в полиметиновой цепи, а также с незамещенной цепью сопряжения. Показано, что краситель с хлор-*о*-фениленовым мостиком обладает значительно меньшим квантовым выходом фотодеструкции, что может объясняться электронной стабилизацией хромофора и созданием стерических затруднений. В присутствии молекул воды и метилвиолена наблюдается существенное повышение квантового выхода фотодеструкции красителя с хлор-*о*-фениленовым мостиком, в отличие от красителя с полиметиновой цепью без заместителей. Сделано предположение, что расположение уровней молекулярных орбиталей красителя с хлор-*о*-фениленовым мостиком способствует эффективному переносу электрона с возбужденной молекулы красителя на молекулу воды или метилвиолена. Генерация реактивных интермедиатов, например, гидроксильных радикалов или радикалов красителей, может являться причиной высокой фотодинамической активности таких соединений.

Фотодинамическая терапия является развивающимся методом терапии онкологических заболеваний [1]. Цианиновые красители считаются перспективными фотосенсибилизаторами для фотодинамической терапии, свойства которых можно варьировать в широких пределах [2].

Ранее нами было показано, что при электроокислении индотрикарбоцианиновых красителей с заместителями в полиметиновой цепи происходит образование относительно стабильных дикатион-радикалов [3]. Путем проведения электрохимических исследований определены свойства дикатион-радикалов в контролируемых условиях. Для понимания механизма фотоцитотоксичности таких красителей представляется важным установление закономерностей их фотохимических превращений.

В данной работе исследуются фотоиндуцированные процессы, происходящие в молекулах индотрикарбоцианиновых красителей. Объектом данного исследования является краситель **1** (Таблица 1) с 4-*мезо*-хлоридом и 3,5-*о*-фениленовым мостиком в полиметиновой цепи. Красители с хлор-*о*-фениленовым мостиком ранее продемонстрировали высокую фотодинамическую активность *in vivo* [4]. Для сравнения также исследуется краситель **2** с полиметиновой цепью без заместителей.

Таблица 1

Структурные формулы исследованных соединений.

Соединение	Структурная формула
Краситель 1	
Краситель 2	

Растворы красителей при концентрации 50 мкМ готовили в ацетонитриле и производили их деаэрирование путем многократного вакуумирования и наполнения ячейки аргоном.

Образцы подвергали воздействию лазерного излучения с длиной волны 750 нм при плотности мощности 50 – 540 мВт/см<sup>2</sup>. Фотохимические превращения отслеживали по изменению спектров электронного поглощения растворов.

Квантовый выход фотодеструкции красителя **1** в деаэрированном ацетонитрильном растворе составляет  $1,2 \cdot 10^{-6}$  (Таблица 2). Присутствие всего 5 об% воды приводит к повышению квантового выхода фотодеструкции красителя более чем в 3 раза. Добавление в водно-ацетонитрильный раствор эквимольного количества метилвиологена вызывает повышение квантового выхода фотодеструкции еще в 3 раза. В деаэрированном ацетонитрильном растворе квантовый выход фотодеструкции для красителя **2** превышает таковой для красителя **1** более чем в 3 раза. Присутствие в растворе воды и метилвиологена слабо влияет на квантовый выход фотодеструкции красителя **2**.

Таблица 2

Квантовые выходы фотодеструкции (Ф) красителей **1** и **2** в деаэрированных растворах концентрации 50 мкМ.

Растворитель	Ф · 10 <sup>6</sup>	
	Краситель <b>1</b>	Краситель <b>2</b>
MeCN	1,2±0,2	4,4±0,6
MeCN/H <sub>2</sub> O (5 об% H <sub>2</sub> O)	4,4±0,5	5,6±0,6
MeCN/H <sub>2</sub> O (5 об% H <sub>2</sub> O) + 1 экв. метилвиологен	13±4	6,0±0,7

На основании представленных экспериментальных данных можно предположить, что возможен перенос электрона с фотовозбужденной молекулы красителя **1** на молекулу воды. В результате этого может образовываться реактивный гидроксильный радикал. Метилвиологен, являющийся широко применяемым акцептором электронов, также может принимать электроны от молекул красителя **1**. Эффективное взаимодействие красителя **1** с водой и метилвиологеном и отсутствие такового для красителя **2** можно объяснить различием в положении уровней энергии их молекулярных орбиталей. Более низкое значение квантового выхода фотодеструкции красителя **1** в сравнении с красителем **2** можно интерпретировать защитой и электронной стабилизацией хромофора хлор-*o*-фениленовым мостиком.

Полученные результаты исследований имеют важные следствия в плане установления механизма фотоактивности таких красителей в качестве фотосенсибилизаторов для фотодинамической терапии, однако требует дополнительных исследований. Генерация реактивных свободно-радикальных интермедиатов при фотовозбуждении индотрикарбоцианиновых красителей может являться дополнительным механизмом фотоцитотоксичности, в особенности в гипоксических условиях. В дальнейшем процессы фотоиндуцированного переноса электрона с участием молекул индотрикарбоцианиновых красителей будут исследованы при помощи ЭПР спектроскопии и спектроскопии наведенного электронного поглощения с разрешением по времени.

Данная работа выполнена при поддержке ГПНИ «Конвергенция – 2025» (задание 3.03.6) и проекта БРФФИ № Ф22МВ-014.

#### Список литературы

1. Gunaydin, G. Photodynamic therapy for the treatment and diagnosis of cancer—a review of the current clinical status / G. Gunaydin, M.E. Gedik, S. Ayan // *Front. Chem.* – 2021. – Vol. 9. – P. 686303.
2. Dereje D. M. et al. Polymethine dyes for PDT: recent advances and perspectives to drive future applications / D.M. Dereje [et al.] // *Photochem. Photobiol. Sci.* – 2022. – Vol. 21, №. 3. – P. 397–419.
3. Spectroelectrochemical and ESR investigation of free radicals derived from indotricarbocyanine dyes for photodynamic therapy / H.M. Maltanova [et al.] // *Dyes Pigm.* – 2022. – Vol. 205. – P. 110599.
4. Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics / A.A. Lugovski [et al.] // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* – 2016. – Vol. 316. – P. 31–36.



УДК 543.42:678.664

Бобкова Е. Ю., Василевская Л. Н., Васильева В. С., Ксенофонтов М. А., Шкредова Н. А.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Научно-исследовательское учреждение “Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко” Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Методами ИК спектроскопии с привлечением квантово-химических расчетов (в приближении DFT) исследованы алкилрезорцин-формальдегидные композиты с борной кислотой, а также полиуретановые композиты с борной кислотой и ФС (резорцин, пирокатехин, гидрохинон). На основе анализа экспериментальных данных и результатов квантово-химических расчетов структуры и спектров модельных соединений установлено, что при взаимодействии с борной кислотой в случае алкилрезорцинового полимера наиболее вероятно формирование разветвленной структуры с участием бороксиновых колец, а в случае уретанового полимера образование композитов происходит при участии бороксидных групп. Высказано предположение, что различия в способе связывания обусловлены большим содержанием гидроксильных групп в составе алкилрезорцинового полимера. Для полиуретановых композитов на основе ФС наиболее вероятным является присоединение диоксисбензолов по связи C=N.

Одним наиболее доступных и эффективных способов повышения термостабильности и прочности полимеров является введение в их состав различных добавок, в том числе, содержащих в своей структуре бор, а также различные фенольные соединения (ФС). Для установления механизма влияния соединений бора на межмолекулярное взаимодействие в полимерной матрице исследованы полиуретановые и алкилрезорциновые композиты с борной кислотой, также исследовано влияние различных наполнителей (борная кислота, ФС) на формирование полиуретанового композита.

Фенольные газонаполненные полимеры получали одностадийным способом, разработанным ранее в НИИПФП им. А. Н. Севченко, а борсодержащие соединения с полиуретаном – путем проведения реакции этерификации борной кислоты. Для осуществления данной реакции борную кислоту вводили в полиэфирный компонент полиуретановой композиции с последующим добавлением изоцианатного компонента. Композиты полиуретана с ФС получали введением наполнителей в полиэфир в разном процентном соотношении (процент по массе – 0,5%, 1%, 2% от полиэфира). Полученные образцы композитов исследовали методом ИК спектроскопии, с привлечением квантово-химических расчетов, используя теорию функционала плотности (DFT).

Анализ ИКС композитов алкилрезорцинового (фенольного) полимера с борной кислотой, зарегистрированных при различных температурах и концентрациях наполнителей позволил установить следующие закономерности:

- в ИКС с увеличением температуры наблюдается размывание контуров полос с максимумами при 1470, 1200 и 750  $\text{см}^{-1}$ , возникают дополнительные полосы и изменяются контуры полос в области 650 и 520  $\text{см}^{-1}$ , а также изменяется соотношение интенсивностей полос с максимумами при 1470 и 1200  $\text{см}^{-1}$ .

- наблюдается значительный низкочастотный сдвиг полосы поглощения валентных колебаний гидроксильных групп (с 3400 до 3150  $\text{см}^{-1}$ ), изменяется контур полос и происходит перераспределение интенсивностей полос поглощения в области 1700–1100  $\text{см}^{-1}$ , появляются новые полосы при 940, 890 и 780  $\text{см}^{-1}$ .

- полосы при 3340 и 3530  $\text{см}^{-1}$  обусловлены валентными ОН-колебаниями фенольных групп, с участием водородных связей полимерного и димерного типов, соответственно. Установлено, что количество борной кислоты в композиции для получения пенополимера влияет на контур и положение данных полос.

Указанные спектральные закономерности и отсутствие поглощения в области свободных колебаний гидроксила (при 3600  $\text{см}^{-1}$ ) свидетельствуют о снижении концентрации ди-

мерных и полимерных водородных связей за счет возможного участия гидроксильных групп в формировании борсодержащих фрагментов полимера. Кроме того, появление новых полос при 940, 890 и 780  $\text{см}^{-1}$  может быть обусловлено валентными и деформационными колебаниями, локализованными на фрагментах  $-\text{BO}-$  в линейной или циклической борсодержащей группировке.

Для ИК спектров полиуретановых композитов с борной кислотой установлены следующие закономерности:

- в области 1775–1625  $\text{см}^{-1}$  при введении наполнителя растет интенсивность длинноволнового крыла широкой полосы поглощения, которая относится к валентным колебаниям карбониллов  $\nu(\text{C}=\text{O})$  уретановой, амидной, сложной эфирной групп, связанных водородными связями,

- в области 1510–1550  $\text{см}^{-1}$  изменяется контур сложной полосы, обусловленной смешанными по форме колебаниями с участием уретановой группы  $\nu(\text{амид II})$  и колебаниями ароматического кольца.

Наблюдаемые изменения в экспериментальном спектре могут быть вызваны как образованием сетки водородных связей с участием соединений бора, так и с взаимодействием борной кислоты с образованием межмолекулярных комплексов боратов или бороксинов.

В отличие от полиуретановых композитов на основе борной кислоты, в экспериментальных ИКС композитов на основе ФС отсутствуют какие-либо изменения в области колебаний карбонильных групп (1775–1625  $\text{см}^{-1}$ ). При этом наблюдаются дополнительная малоинтенсивная полоса при 1260  $\text{см}^{-1}$ , интенсивность которой при увеличении процентного содержания наполнителя увеличивается незначительно. Изменения в ИКС свидетельствуют об отсутствии взаимодействия между карбонилем уретановой группы и наполнителем и могут объясняться присоединением молекул диоксибензолов лишь по  $\text{C}=\text{N}$  связи изоцианата, что вероятно вызвано большей прочностью связи  $\text{C}=\text{O}$  в изоцианатах по сравнению с азометиновой связью. В силу этого присоединение изоцианатов по связи  $\text{C}=\text{O}$  требует преодоления существенно большего барьера свободной энергии, чем по связи  $\text{C}=\text{N}$ , что подтверждается DFT расчетами при изучении механизма реакций взаимодействия фенилизотиоцианата с линейными ассоциатами метанола, а так же реакций метилизоцианата с мономером фенола и его линейным димерным комплексом с водородной связью [1].

Для объяснения наблюдаемых спектральных изменений предложены структурные модели, и выполнены квантовохимические расчёты колебательных ИК спектров фрагментов борсодержащих полимеров на основе алкилрезорцинов и на основе полиуретана. Вычисления осуществлялись в рамках формализма DFT при помощи прикладной программы GAMESS-US в приближении B3LYP/cc-pVDZ. Предварительно расчёты выполнены для изолированных молекул бороксина (с учётом четырёх изотопмеров), резорцина и фрагмента полиуретановой цепочки. Затем рассчитывали структурные модели участков бор-содержащих (фрагменты I и II, рис. 1) алкилрезорцинов и (фрагменты III, IV и V) уретанов.

Фрагменты I и II моделируют взаимодействие соединений бора с алкилрезорциновым полимером (рис. 1, а, б).

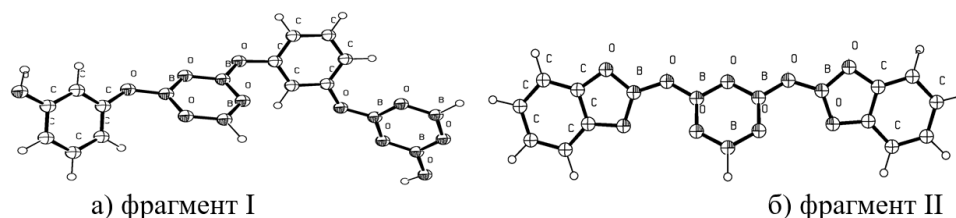
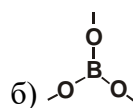
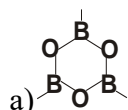


Рисунок 1 – Рассчитанные модельные структуры фрагментов борсодержащих алкилрезорциновых композитов

Для уретанового полимера расчет проводили для трех структурных фрагментов (III, IV и V).

Фрагмент III построен соединением участков полимерных цепочек через концевые гидроксильные группы и бороксиновое кольцо ( $B_3O_3$ ) (а), Фрагмент IV – соединением полимерных участков через бороксидную группу ( $BO_3$ ) (б).



Фрагмент V – соединением полимерных цепочек через атомы азота уретановой группы и структуру борксина.

На основе квантово-химических расчётов для фрагментов борсодержащих алкилрезорциновых композитов установлено, что наблюдаемые изменения в спектрах могут быть обусловлены формированием бороксинового цикла. При этом наблюдаемые спектральные закономерности отвечают фрагменту I строения полимера, поскольку в случае фрагмента II рассчитанный спектр содержит характерную интенсивную полосу около  $1266\text{ см}^{-1}$ , обусловленную валентными колебаниями O-C-связей гетероцикла. Такая полоса отсутствует в экспериментальных спектрах.

Для уретанового полимера анализ теоретических колебательных спектров моделей III и IV позволил установить следующие закономерности:

В случае образования межмолекулярных связей через структуру борксина (модель III) в рассчитанном спектре наблюдается интенсивная полоса  $1415\text{ см}^{-1}$ , относящаяся к колебаниям бороксинового цикла. В спектре модели IV, при образовании межмолекулярных связей через бороксидную группу данная полоса отсутствует;

- в обоих случаях наблюдается смещение  $\Delta\nu = 60\text{ см}^{-1}$  в длинноволновую область спектра полосы  $\nu(C=O)$ , ответственной за колебания карбонила полиэфирной группы, расположенной возле атома бора, по сравнению с  $\nu(C=O)$  валентного колебания карбонила уретановой группы;

- при оптимизации геометрии модели V, образование комплекса не происходило вследствие стерических затруднений.

В экспериментальном спектре композита наблюдается длинноволновое плечо  $1650\text{ см}^{-1}$  только у полосы  $1700\text{ см}^{-1}$ , ответственной за  $\nu(C=O)$  карбонила уретановой группы ( $\Delta\nu = 1700 - 1650 = 50\text{ см}^{-1}$ ), и отсутствуют существенные изменения в области  $1350 - 1410\text{ см}^{-1}$ , характерные для колебаний бороксинового кольца. Исходя из этого, при формировании уретанового композита с борной кислотой наиболее вероятным представляется образование межмолекулярных связей с участием бороксидной группы  $BO_3$ . Полученный результат согласуется с данными по синтезу полиуретанов на основе аминоэфиров борной кислоты [2].

Таким образом, анализ экспериментальных колебательных спектров и результатов квантово-химических расчетов позволил предположить, что изменения в ИКС борсодержащих композитов могут быть вызваны как образованием сетки водородных связей с участием соединений бора, так и образованием межмолекулярных комплексов. При этом у уретанового полимера происходит образование композитов при участии бороксидной группы. Для алкилрезорцинового полимера наиболее вероятно образование связей через бороксиновое кольцо. Различия в способе связывания, на наш взгляд, обусловлены большим содержанием гидроксильных групп в составе алкилрезорцинового полимера. Для уретановых композитов на основе ФС наиболее вероятным является присоединение диоксибензолов по связи C=N.

#### Список литературы

1. Самуилов, А. Я. Квантово-химическое изучение реакций фенилизоцианата с линейными ассоциатами метанола // А. Я. Самуилов, Л. А. Зенитова, Я. Д. Самуилов, А. И. Коновалов. – ЖОрХ, 2009. – т. 45. – С. 75–80.
2. Шур, А. М. Высокомолекулярные соединения: учебник для университетов / А. М. Шур. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 656 с.

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПРЯМОЗОННОГО СОЕДИНЕНИЯ $\text{CuInSe}_2$ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

<sup>1</sup> Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Исследована зависимость спектров фотолюминесценции тонких пленок соединения  $\text{CuInSe}_2$  с соотношением металлов  $[\text{Cu}]/[\text{In}] \approx 1,05$  от температуры в диапазоне  $\sim 4,2 - 70$  К. В спектрах фотолюминесценции наблюдаются узкие линии  $\sim 1,040$  эВ,  $1,043$  эВ и  $\sim 1,034$  эВ, относящиеся к свободным экситонам А, В и связанным экситонам М2 на дефектах структуры, соответственно. Интенсивная широкая полоса  $P \sim 0,970$  эВ отнесена к излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда (электронов и дырок) на донорно-акцепторных парах (DAP).

Прямозонное полупроводниковое соединение  $\text{CuInSe}_2$  и твердые растворы на его основе  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ,  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$  являются перспективными материалами современной фотовольтаики с эффективностью фотопреобразования на уровне  $\sim 15 - 23,35$  % [1–3]. К настоящему времени опубликовано небольшое число научных статей по оптическим характеристикам тонких пленок  $\text{CuInSe}_2$  высокого структурного качества с составом близким к стехиометрии  $[\text{Cu}]/[\text{In}] \approx 1$ . Поэтому исследование структурных и оптических характеристик высококачественных тонких пленок  $\text{CuInSe}_2$ , как базового материала с малой концентрацией собственных дефектов, является методологической основой для достоверного установления процессов дефектообразования в материалах такого типа с разной степенью отклонения состава от стехиометрии. В данной работе определены механизмы излучательной рекомбинации носителей заряда в интервале криогенных температур  $\sim 4,2 - 70$  К и установлено положение энергетических уровней ростовых дефектов в запрещенной зоне соединения  $\text{CuInSe}_2$ .

Исследования проведены на тонких пленках  $\text{CuInSe}_2$  с толщиной  $1,5 - 1,6$  мкм, выращенных на стеклянных подложках в процессе двухстадийной селенизации [4]. Элементный состав пленок определялся методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе. Установлено, что пленки  $\text{CuInSe}_2$  имеют состав  $\text{Cu} \sim 25,2$  ат.%,  $\text{In} \sim 24,0$  ат.%,  $\text{Se} \sim 50,8$  ат.% с соотношением атомных долей элементов  $[\text{Cu}]/[\text{In}] \approx 1,05$ . Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались дифракционным монохроматором с фокусным расстоянием зеркального объектива  $\sim 100$  см с Ge *p-i-n* фотодетектором, работающим в спектральном диапазоне  $0,5 - 1,7$  мкм (Рисунок 1). Возбуждение неравновесных носителей заряда осуществлялось аргоновым лазером на длине волны  $514$  нм. В экспериментах использовался криостат замкнутого цикла (Advanced Research Systems, США).

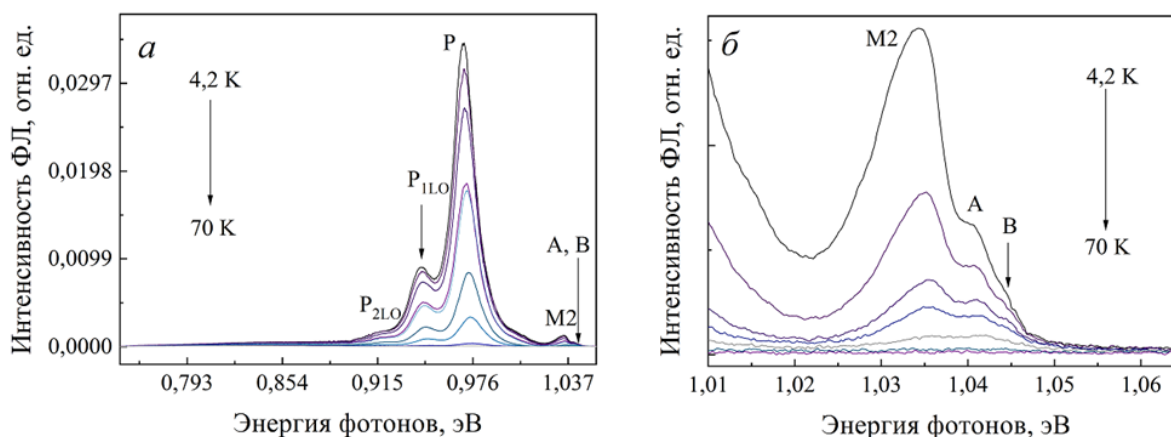


Рисунок 1 – Температурная зависимость спектров фотолюминесценции тонкой пленки  $\text{CuInSe}_2$  с  $[\text{Cu}]/[\text{In}] \approx 1,05$ .

На рисунке 1а представлены спектры ФЛ тонкой пленки CuInSe<sub>2</sub>, снятые при криогенных температурах ~ 4,2 – 70 К. Рисунок 1б демонстрирует увеличенную в масштабе спектральную область от 1,01 эВ до 1,07 эВ. Узкие линии с максимумами А ~ 1,040 эВ и В ~ 1,043 эВ обусловлены излучательной рекомбинацией свободных экситонов. Узкая линия М2 ~ 1,034 эВ соответствует излучательной рекомбинации связанных экситонов на дефектах структуры. При повышении температуры до 50 – 70 К интенсивность линий А, В и М2 уменьшается и они смещаются в область высоких энергий на ~ 1,8 мэВ. Эффект высокоэнергетического смещения линий А, В и М2 может быть обусловлен увеличением ширины запрещенной зоны E<sub>g</sub> соединения CuInSe<sub>2</sub> из-за тетрагонального искажения кристаллической решетки и изменения параметров элементарной ячейки *a* и *c* в диапазоне температур 10 – 70 К в соответствии с данными работ [5,6].

Как видно на рисунке 1а, наиболее интенсивной в спектрах ФЛ является широкая полоса Р ~ 0,970 эВ с низкоэнергетическими компонентами Р<sub>1LO</sub> ~ 0,943 эВ и Р<sub>2LO</sub> ~ 0,916 эВ, обусловленная излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда в соединении CuInSe<sub>2</sub> с участием одного 1LO и двух 2LO продольных оптических фононов с энергией LO ~ 27 мэВ, соответственно [4]. С ростом температуры от 4,2 К до 70 К бесфононная полоса Р и ее фононные повторения Р<sub>1LO</sub> и Р<sub>2LO</sub> смещаются на ~ 6,8 мэВ в область высоких энергий.

Математическая обработка зависимости интенсивности *I* от температуры *T* осуществлена с использованием следующего выражения [7]:

$$I(T) = \frac{I_0}{\left[1 + a_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{kT}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{E_{a2}}{kT}\right)\right]}$$

где *I*<sub>0</sub> – интенсивность излучения при температуре ~ 4,2 К, *a*<sub>1</sub>, *a*<sub>2</sub> – подгоночные параметры, *E*<sub>а1</sub>, *E*<sub>а2</sub> – энергии активации, *k* – постоянная Больцмана.

Обработка экспериментальных данных полосы Р позволила определить значения энергии активации *E*<sub>а1</sub> и *E*<sub>а2</sub>, соответствующие двум наклонам кривой аппроксимации (Рисунок 2-3).

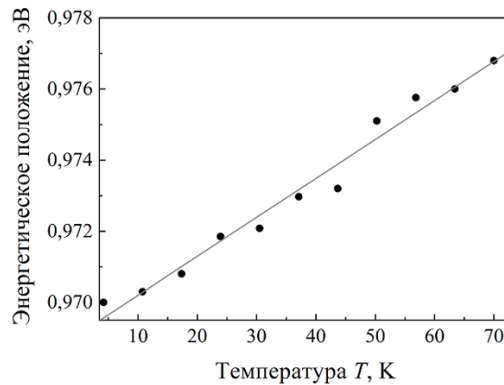


Рисунок 2– Зависимость энергетического положения полосы фотолуминесценции Р ~ 0,970 эВ от температуры.

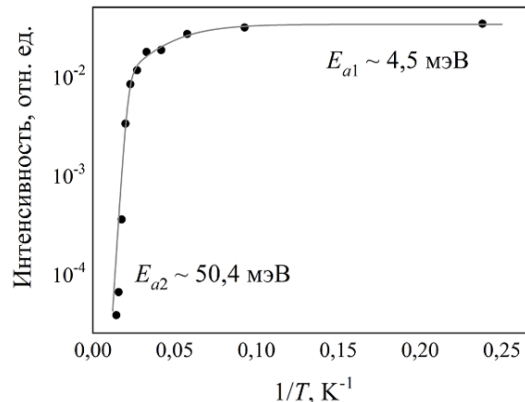


Рисунок 3 – Температурная зависимость гашения интенсивности полосы фотолуминесценции Р ~ 0,970 эВ

Для температурного диапазона 4,2 – 30 К энергия активации составила  $E_{a1} \approx 4,5$  мэВ, а для диапазона  $> 30$  К  $E_{a2} \approx 50,4$  мэВ. Энергия активации  $E_{a1} \approx 4,5$  мэВ определяет энергетическое положение донорного уровня вблизи зоны проводимости, а энергия активации  $E_{a2} \approx 50,4$  мэВ определяет энергетическое положение акцепторного уровня вблизи валентной зоны. Донорный уровень может быть отнесен к дефектам структуры в тонких пленках  $\text{CuInSe}_2$  – междоузельным атомам меди  $\text{Cu}_i$  или атомам индия, замещающим медь,  $\text{In}_{\text{Cu}}$ , а акцепторный уровень – к вакансиям меди  $V_{\text{Cu}}$  [8].

Работа выполнена при поддержке проекта БРФФИ Ф22М–010.

#### Список литературы

1. Potassium fluoride postdeposition treatment with etching step on both Cu-rich and Cu-poor  $\text{CuInSe}_2$  thin film solar cells / F. Babbe [et al.] // Phys. Rev. Mater. – 2018. – Vol. 2. – P. 105405-1–105405-9.
2. Effects of heavy alkali elements in Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with efficiencies up to 22.6 % / P. Jackson [et al.] // Phys. Stat. Sol. PRL. – 2016. – Vol. 10. – P. 583–586.
3. Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cell with a New World Record Efficacy of 23.35 % / M. Nakamura [et al.] // IEEE J. Photovolt. – 2019. – Vol. 9. – P. 1863–1867.
4. Optical properties and band gap energy of  $\text{CuInSe}_2$  thin films prepared by two-stage selenization process / M. V. Yakushev [et al.] // J. Phys. Chem. Sol. – 2003. – Vol. 64, Iss. 9–10. – P. 2005–2009.
5. Optical properties of high-quality  $\text{CuInSe}_2$  single crystals / A. V/ Mudryi [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77. – P. 2542–2544.
6. Thermal expansion of  $\text{CuInSe}_2$  in the 11– 1073 K range: an-X-ray diffraction study / W. Paszkowicz [et al.] // Appl. Phys. A. – 2014. – Vol. 116. – P. 767–780.
7. Bimberg, D. Thermal Dissociation of Excitons Bounds to Neutral Acceptors in High-Purity GaAs / D. Bimberg, M. Sondergeld, E. Grobe // Phys. Rev. B. – 1971. – Vol. 4, № 10. – P. 3451–3455.
8. A photoluminescence study of excitonic grade  $\text{CuInSe}_2$  single crystals irradiated with 6 MeV electrons / M. V. Yakushev [et al.] // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 118. – P.1555703-1–155703-7.

УДК 543.423

Воропай Е. С.<sup>1</sup>, Ермалицкая К. Ф.<sup>1</sup>, Самцов М. П.<sup>2</sup>, Тарасов Д. С.<sup>1,2</sup>, Радько А. Е.<sup>2</sup>,  
Шевченко К. А.<sup>2</sup>, Кирсанов А. А.<sup>1</sup>

## ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С АХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ВНЕОСЕВЫХ ПАРАБОЛОИДОВ

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ,  
Минск, Беларусь

Разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр с ахроматической оптической схемой на основе внеосевых параболоидов. Новый спектрометр отвечает всем требованиям, предъявляемым к аппаратуре для лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, а также обладает рядом преимуществ, обусловленных особенностями конструкции и технических характеристик компонентов ЛАЭМС. Спектрометр ЛАЭМС позволяет проводить исследования как с использованием одноимпульсного, так и двухимпульсного режима лазерной абляции и возбуждения эмиссионных спектров.

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия — один из наиболее быстро развивающихся и широко используемых методов элементного качественного и количественного анализа объектов в последние два десятилетия. Несмотря на большое количество научных работ по лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии, значительная доля исследований проводится не с применением готовых спектрометров, а на основе собранных из отдельных узлов установок на базе научно-исследовательских лабораторий и научно-практических центров. Данные установки отвечают требованиям, которые предъявляются к спектрометрам, однако существенно ограничены для использования в учебных целях и для проведения большого объема измерительных работ разной направленности. На кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ и в лаборатории спектроскопии НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ разработан и изготовлен лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр (ЛАЭМС) для научно-учебных целей [1]. При разработке ЛАЭМС использованы принципиальные и схемные решения, призванные приблизить его к современным потребностям в такой аппаратуре в повседневной практике.

Оптическая схема спектрометра представлена на рисунке 1. Ее разработка осуществлялась с учетом требований абберрационно-оптического и технико-технологического характера. В качестве источника возбуждения спектрометр оснащен двумя неодимовыми лазерами с накачкой полупроводниковыми матрицами лазерных диодов (разработка Института физики НАН Беларуси). Использование накачки полупроводниковыми матрицами лазерных диодов вместо накачки импульсными лампами позволяет существенно увеличить ресурс системы и стабильность выходных характеристик. Двухимпульсный лазер обеспечивает генерацию сдвоенных лазерных импульсов длительностью  $\leq 15$  нс с  $\lambda = 1064$  нм с варьируемым в пределах 1—100 мкс интервалом с энергиями до 100 мДж при частотах следования пар импульсов  $< 10$  Гц. Для регистрации спектров плазмы используются спектрометры с регистрацией на ПЗС-линейке: 18 — на основе полихроматора SDH-1 (ЗАО «СОЛАР Лазерные системы», диапазон 190—800 нм, разрешение 0.1 нм при ширине одновременно регистрируемого спектрального интервала 150 нм), 19 — спектрометр оригинальной конструкции.

Управление режимами работы лазерных источников, системами сканирования образца и системами регистрации спектров осуществляется с использованием оригинального программного обеспечения (ПО), которое обеспечивает одновременное управление всеми узлами ЛАЭМС и основные функции предварительной обработки, анализа и отображения спектральных данных. Разработка ПО выполнена средствами языка C++ в среде Microsoft Visual Studio 2005. При разработке использовалось SDK контроллера систем регистрации фирмы ORMINS на основе CCD датчиков. Управление дифракционной решеткой полихроматора выполняется вручную, показания микровинта используются в программном обеспечении ЛАЭМС для калибровки спектрального диапазона полихроматора с системой регистрации.

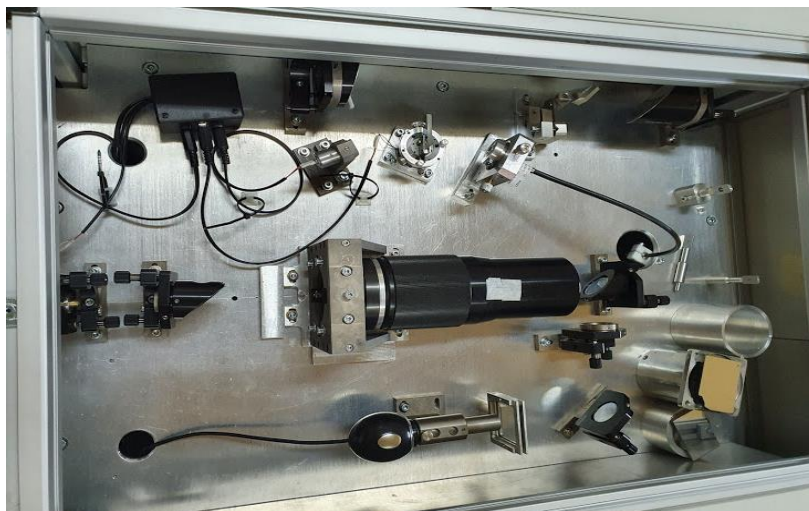


Рисунок 1 – Оптическая схема ЛАЭМС

ПО ЛАЭМС предоставляет возможность регистрации спектров в четырех режимах: одиночный цикл регистрации спектра фонового сигнала, одиночный цикл регистрации спектра из одной точки, одиночный цикл регистрации спектров из распределенных по заданной площади точек и непрерывный цикл регистрации спектров из одной точки без сохранения данных. Оператор ПО ЛАЭМС имеет возможность задавать энергию импульсов и время задержки между СЛИ, просматривать и выполнять предварительную обработку полученных данных. Несомненным достоинством ПО ЛАЭМС является встроенная база данных спектральных линий, на основании которой могут быть созданы методики качественного и количественного элементного анализа образцов (количество определяемых химических элементов до 50).

На базе ЛАЭМС разработаны методики качественного и количественного микроанализа артефактов и старинных монет, зарегистрированы эмиссионные спектры подлинных и фальшивых старинных монет, варварских имитаций римских имперских денариев, найденных на территории Беларуси и хранящихся в собрании нумизматического кабинета БГУ, в частных коллекциях; плакированных золотом римских монет, а также фрагментов ювелирных украшений, относящихся к I тыс. до н.э., найденных на территории современной Беларуси [2].

Предложен метод оценки толщины молекулярных соединений на поверхности металлических изделий для последующего исключения соответствующих спектральных данных из результатов анализа. Установлено, что при лазерной абляции образцов чистого металла при фиксированных параметрах излучения относительная интенсивность спектральных линий при абляции современного образца может значительно (до 30 %) превышать интенсивность старого образца, который некоторое время находился под землей. длительное время. Таким образом, количественный анализ с использованием градуировочных кривых, построенных на основе современных стандартных образцов, приведет к неверным результатам. При этом переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции, приводящий к многократному увеличению относительной интенсивности спектральных линий, очень важен, так как позволяет значительно повысить чувствительность анализа и снизить ошибки.

#### Список литературы

1. Воропай Е. С. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай [и др.] // ЖПС. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 485-492.
2. Ermalitskaia K. F. Elemental analysis of obsolete brittle metal samples using a two-pulse laser spectrometer / K. F. Ermalitskaia, P. A. Ivanova, Y. I. Matyush // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2023. – № 1. – С. 78–84.



## СПЕКТРЫ И ИНТЕНСИВНОСТЬ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФТОРИДА ЛИТИЯ

Институт физики НАН Беларуси, – Минск, Беларусь

В температурном диапазоне от 80 К до 300 К проведено сравнение спектров термолюминесценции для нанокристаллов и кристаллов фторида лития. Измерены интегрированные по спектру и температурному диапазону интенсивности термолюминесценции для образцов фторида лития двух типов, отличающихся наличием возможности формирования радиационных центров окраски с новыми свойствами. Обнаружено, что в образцах фторида лития, содержащих указанные центры окраски, интенсивность существенно выше. Показано, что в спектрах нанокристаллов и кристаллов наблюдаются четыре и одна полосы соответственно.

Формирование и характеристики радиационных точечных дефектов (центров окраски (ЦО)) в ионных кристаллах исследуются на протяжении многих лет. Необходимость исследований обусловлена разнообразными применениями таких материалов. Например, они широко используются для дозиметрии и детектирования ионизирующего излучения и элементарных частиц. Нанокристаллы (НК) из таких материалов перспективны для применений в качестве дозиметров с улучшенными характеристиками. Они демонстрируют намного более широкую область линейного отклика на дозу радиации или флюенс заряженных частиц, чем макрокристаллы того же состава [1]. Широко используемым материалом в радиационной дозиметрии является фторид лития. Несмотря на длительное использование термолюминесцентных дозиметров на основе LiF, исследования их свойств и выяснение путей их совершенствования продолжают [2,3].

В кристалле определенного состава создаются присущие ему ЦО с определенными свойствами и параметрами. В ионных кристаллах возможно формирование центров окраски с характеристиками, существенным образом отличающимися от аналогичных характеристик ранее известных ЦО того же состава. В работах [4,5] показано, что во фториде лития и в других ионных кристаллах могут быть сформированы радиационные центры окраски с новыми, неизвестными ранее свойствами. Условия для формирования таких центров создаются как в нанокристаллах, полученных при механической фрагментации кристаллов, так и при специальных технологических воздействиях на кристаллы [6]. Термолюминесценция (ТЛ) кристаллов, в которых при воздействии радиацией возникают дефекты с новыми свойствами, представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе приведены результаты исследований ТЛ таких объектов, сравниваются спектры и интенсивности низкотемпературной ТЛ в области 80—300 К для образцов фторида лития двух типов, обладающих и не обладающих свойствами для формирования радиационных центров окраски с новыми свойствами.

Измерялась ТЛ кристаллических пластинок и НК LiF. Пластинки вырезались из номинально чистого монокристалла вдоль плоскости {100}. НК изготавливались путем механической фрагментации некоторых пластинок в шаровой мельнице (Vibrator GM 9458, Германия). Изображения НК, полученные на просвечивающем электронном микроскопе, показали, что большинство из них имеют размеры от 50 до 500 нм. Для экспериментов взяты образцы из НК трех типов, приготовленных разными способами. В первом случае образец состоял из изготовленных НК, которые перед облучением  $\gamma$ -квантами выдерживались не менее 24 ч при комнатной температуре. Во втором случае изготовленные НК перед облучением отжигались при температуре 500 °С в течение 1 ч. Третий тип образцов представлял собой таблетки, спрессованные из не отожженных НК. Проведенные ранее измерения [4,6] показали, что радиационные центры окраски с новыми свойствами не наблюдаются в кристаллических пластинках и в НК, отожженных перед облучением при  $T_{отж} = 500$  °С; в других используемых образцах такие центры формируются. Приготовленные кристаллические пластинки и образцы из НК облучались  $\gamma$ -квантами от источника  $^{60}\text{Co}$  дозой 50 кГр при температуре жидкого

азота. После облучения каждая пластинка или образец из НК извлекались из азота и помещались в одну из двух измерительных установок при комнатной температуре. В установках температура образца постепенно (без дополнительного подогрева) повышалась от температуры жидкого азота до комнатной, т. е. от  $\sim 80$  К до 300 К. Спектры и суммарные интенсивности ТЛ, испускаемой образцом в процессе изменения температуры, регистрировались с помощью разных экспериментальных установок.

С помощью фотометрической сферы измерены временные зависимости интегральной по спектру интенсивности ТЛ в единицах фототока приемника (с учетом его спектральной чувствительности). Из полученных зависимостей найдены интегральные по спектрам и диапазону изменения температур интенсивности ТЛ. Эти интенсивности нормированы на вес образцов, что позволяло сравнивать их для образцов различных типов, облученных одинаковой дозой.

На рисунке 1 для таблетки из НК и кристаллической пластинки представлены временные зависимости интенсивности ТЛ. Измерения зависимостей начинались до возникновения ТЛ, однако для единообразия начала отсчета времени показана регистрация сигналов с момента возникновения ТЛ  $t_0$ , принятого за нуль. Различия в скорости роста и продолжительности свечения для таблетки из НК и кристаллической пластинки объясняются меньшей толщиной таблетки по сравнению с пластинкой и, следовательно, более быстрым нагреванием таблетки до комнатной температуры после выемки из жидкого азота.

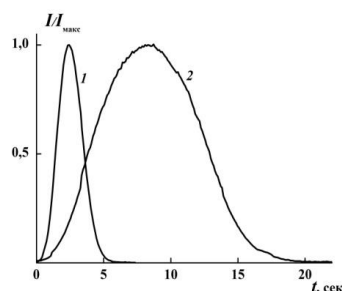


Рисунок 1 – Временные зависимости интенсивностей ТЛ, нормированных к максимальным значениям, для таблетки из НК (1) и кристаллической пластинки (2) при их нагревании от 80 до 300 К.

Спектры ТЛ регистрировались на протяжении всего времени высвечивания образцов. На рисунке 2 представлены спектры, измеренные в различные моменты высвечивания, для двух кристаллических пластинок, изготовленных из разных образцов монокристалла LiF.

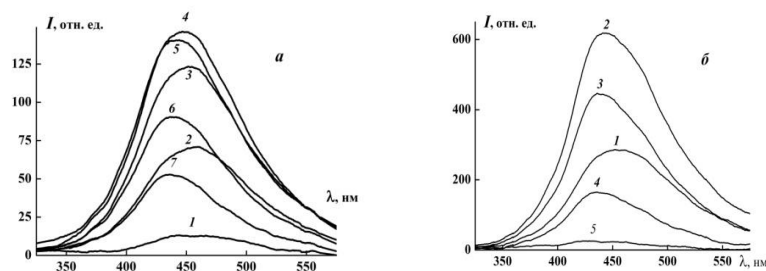


Рисунок 2. Изменения спектров ТЛ двух кристаллических пластинок, изготовленных из разных образцов монокристалла LiF (а и б), облученных  $\gamma$ -квантами при температуре жидкого азота и нагреваемых от 80 до 300 К; температура нагревания возрастает в последовательности, указанной цифрами у спектров.

Измерения в диапазоне 300—600 нм демонстрируют наличие одной полосы излучения с максимумом при 450 нм. При регистрации ТЛ в диапазоне 450—900 нм записывается только длинноволновая часть той же полосы. Таким образом, в спектре ТЛ кристаллов LiF в изучаемой низкотемпературной области регистрируется одна полоса.

Спектры ТЛ образцов из НК, не отоженных перед облучением, частично представлены на рисунке 3. Спектры 1 и 2 зарегистрированы в различные временные интервалы после

начала нагревания образцов (сначала спектр 1, затем спектр 2), т. е. при различных температурах образцов. Эти температуры неодинаковы для случаев, проиллюстрированных на рис. 3. Отметим, что при варьировании времени записи по отношению к началу ТЛ количество полос в спектрах не изменяется в отличие от соотношения максимальных интенсивностей.

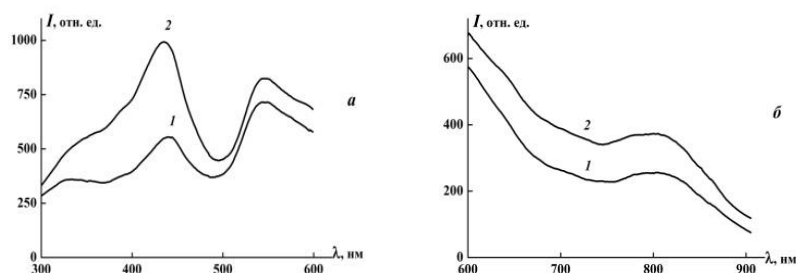


Рисунок 3. Спектры термолюминесценции нанокристаллов из фторида лития, облученных  $\gamma$ -квантами при температуре жидкого азота и нагреваемых от 80 до 300 К; спектры зарегистрированы в диапазонах 300—600 нм (а) и 600—900 нм (б) в каждом по два раза за время нагревания образцов (1 и 2).

В спектрах ТЛ образцов, состоящих из НК, наблюдается полоса с максимумом при  $\sim 440$  нм, которая регистрировалась и для кристаллических пластинок (см. рис. 4, а и рис. 2). Кроме того, в спектрах НК имеются еще три ярко выраженные полосы с максимумами при  $\sim 330$ , 545 и 800 нм. Таким образом, спектры ТЛ кристаллов и НК LiF сильно различаются. Полученные результаты показывают, что характеристики термолюминесценции в образцах фторида лития, в которых возможно формирование радиационных центров окраски с новыми свойствами, существенно отличаются от характеристик в образцах, где такое формирование невозможно.

Измерения интенсивностей термолюминесценции, интегральных по спектру и изменению температуры в диапазоне 80—300 К, позволили сравнить их для образцов, в которых возможно и невозможно формирование радиационных центров окраски с новыми свойствами. Интенсивности, нормированные на вес, для образцов первого типа в  $\sim 2,4$  раза больше, чем для образцов второго типа. Это позволяет рассматривать возможность использования подобных образцов для изготовления дозиметров ионизирующего излучения повышенной чувствительности.

#### Список литературы

1. Lecoq P., Gektin A., Korzhik M. Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering. — Berlin.: Springer, 2017. — 408 p.
2. Parisi A., Dabin J., Schoonjans W., Van Hoey O., Megret P., Vanhavere F. Photon energy response of LiF:Mg,Ti (MTS) and LiF:Mg,Cu,P (MCP) thermoluminescent detectors: Experimental measurements and microdosimetric modeling// Radiat. Phys. Chem.— 2019. — Vol. 163, No. 1. P. 67—73.
3. Arzaga-Barajas E., Massillon G. Thermoluminescent relative efficiency of TLD-100 glow peaks after exposure to X-rays of 20 kV–300 kV,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  gamma// Radiat. Phys. Chem.— 2021. — Vol. 146, No. 1. P. 106635(1—6).
4. Voitovich A. P., Kalinov V. S., Korzhik M. V., Martynovich E. F., Runets L. P., Stupak A. P. The aggregation and characteristics of radiation-induced defects in lithium fluoride nanocrystals// Radiat. Eff. Def. Solids — 2013. — Vol. 168, No. 2. P. 130—136.
5. Voitovich A. P., Kalinov V. S., Loiko M. V., Martynovich E. F., Mateos X., Novikov A. N., Pershukovich P. P., Runets L. P., Serres J. M., Stupak A. P. Luminescent properties of radiation induced defects in sodium and magnesium fluorides nanocrystals // J. Lumin.— 2018. — Vol. 201, No. 1. P. 57—64.
6. Voitovich A. P., Ignatenko O. V., Kalinov V. S., Kostik O. E., Novikov A. N. Radiation-induced color centers with new properties in lithium fluoride crystals subjected to thermal shocks or compression// Radiat. Eff. Def. Solids — 2021. — Vol. 176, No. 5-6. P. 529—537.

## СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССОЦИИИ ТЕМОПОРФИНА ИЗ КОМПЛЕКСОВ ВКЛЮЧЕНИЯ С ПОЛИМЕРНЫМ ЦИКЛОДЕКСТРИНОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» БГУ, Минск, Беларусь

В работе показана возможность использования спектральных характеристик фотосенсибилизатора мета-тетрагидроксибензилхлорина (мТГФХ) для анализа процессов его ассоциации и диссоциации из состава комплексов с полимерным циклодекстрином. В качестве характеристики, позволяющей следить за процессом выхода мТГФХ может выступать изменение формы спектра флуоресценции. С использованием установленных спектральных методов показано, что скорость выхода мТГФХ из комплексов с полимером значительно ниже в сравнении с комплексами с мономерным циклодекстрином.

$\beta$ -циклодекстрины ( $\beta$ -ЦД), получаемые ферментативным путём из крахмала углеводы, представляют собой циклические олигосахариды торической формы с сквозной гидрофобной полостью [1]. Подобное строение обуславливает возможность образовывать комплексы включения посредством взаимодействия гость-хозяин с различными органическими молекулами [2]. Использование  $\beta$ -ЦД для создания платформ фармакологических форм препаратов, позволяет улучшить растворимость и биодоступность молекул лекарственного соединения [3].

Считается, что повысить эффективность и применимость  $\beta$ -ЦД возможно путем их включения в полимерные структуры. За счёт высокой гибкости полимерной цепи возможно установление нескольких контактов молекул лекарственного соединения с одной молекулой носителя (Рисунок 1). Следовательно, использование ЦД-содержащих полимеров, а также материалов на их основе позволит существенно увеличить время существования фармпрепарата по сравнению с нативным ЦД [4]. Подобные изменения свойств комплексов включения расширяют возможности регуляции фармакокинетики лекарств в организме. Применение полимеров на основе ЦД в качестве наноносителей предполагает необходимость разработки методов контроля выхода лекарств из комплексов с ними.

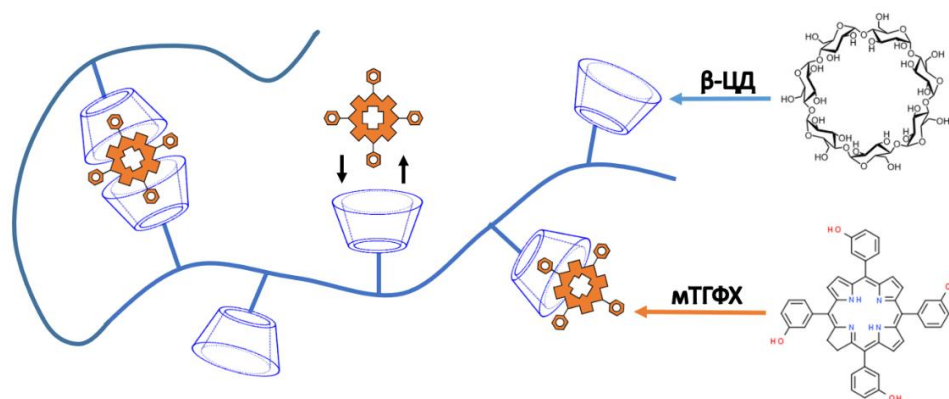


Рисунок 1 – Схематическое изображение образования комплексов включения фотосенсибилизатора Темопорфин (мТГФХ) с полимерными ЦД.

В нашей работе с использованием спектральных методов проведено сравнение скоростей процесса диссоциации мета-тетрагидроксибензилхлорина (мТГФХ) из состава комплексов включения с мономерным/полимерным ЦД. мТГФХ – это фотосенсибилизатор (ФС) второго поколения, который в настоящее время используется в клинической практике для фотодинамической терапии [5].

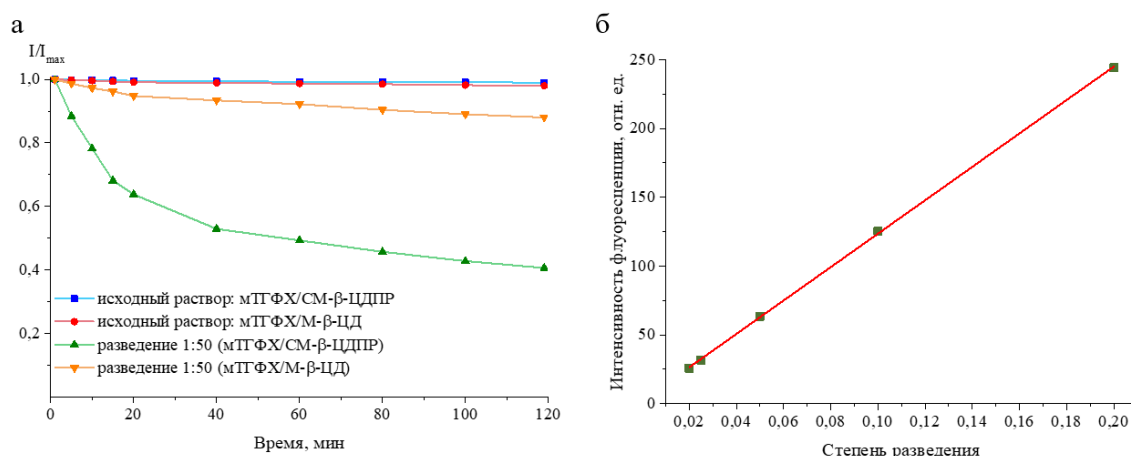
мТГФХ был предоставлен компанией Biolitec Research GmbH (Йена, Германия). Растворимый полимер карбоксиметил- $\beta$ -циклодекстрина (КМ- $\beta$ -ЦДПР) был приобретен у фирмы CYCLOLAB R&D. Ltd., (Будапешт, Венгрия). КМ- $\beta$ -ЦДПР получают случайным сшиванием мономеров циклодекстрина. Средняя молекулярную массу полимера – 153 кДа. Расчетное содержание циклодекстрина 50–70%. Метил- $\beta$ -ЦД (М- $\beta$ -ЦД) был получен из AraChem (Нидерланды).

Регистрация флуоресцентных характеристик проводилась на спектрофлуориметре «Solar CM-2203» (Республика Беларусь), оборудованном термостатируемой ячейкой с магнитной мешалкой и съемными поляризаторами. Оптическая плотность всех образцов на длинах волн возбуждения и регистрации флуоресценции не превышала 0,3.

В силу высокой степени неполярности молекулы мТГФХ в водной среде агрегируют, что сопровождается значительным изменением спектров поглощения, флуоресценция практически полностью исчезает. Добавление в водный раствор мТГФХ мономерных и полимерных производных  $\beta$ -ЦД сопровождается восстановлением их флуоресцентных свойств. Это является следствием мономеризации молекул ФС в водной среде из-за образования комплексов включения мТГФХ/ ЦД [5].

Процесс образования комплексов включения между мТГФХ и производными ЦД носит равновесный характер. Поэтому при недостатке свободных центров связывания молекулы мТГФХ диссоциируют из комплексов и агрегируют. Анализ изменений интенсивности флуоресценции может быть использован для определения количественных характеристик процесса выхода мТГФС из комплексов ЦД.

На рисунке 2а представлены графики зависимости изменения интенсивности флуоресценции мТГФХ после разведения комплексов включения фосфатно-солевым буфером Дюльбека. Для Темопорфина в комплексах с КМ- $\beta$ -ЦДПР, интенсивности флуоресценции меняется пропорционально изменению концентрации комплексов (линейная зависимость,  $R^2 = 0.9998$ ) (рисунок 2б) и претерпевают 10% снижение интенсивности флуоресценции за время порядка двух часов. Значения степени поляризации флуоресценции при разведении испытывают незначительные колебания около 22%. Исходя из этого можно сделать вывод о высокой устойчивости комплексов с полимером. Согласно ранее полученным результатам, скорость выхода мТГФХ из комплексов включения с нативными  $\beta$ -ЦД при разведении существенно выше.



Концентрации в исходных растворах:  
 мТГФХ ( $2 \times 10^{-6}$  моль/л), КМ- $\beta$ -ЦДПР ( $1 \times 10^{-5}$  моль/л), М- $\beta$ -ЦД ( $1 \times 10^{-5}$  моль/л).

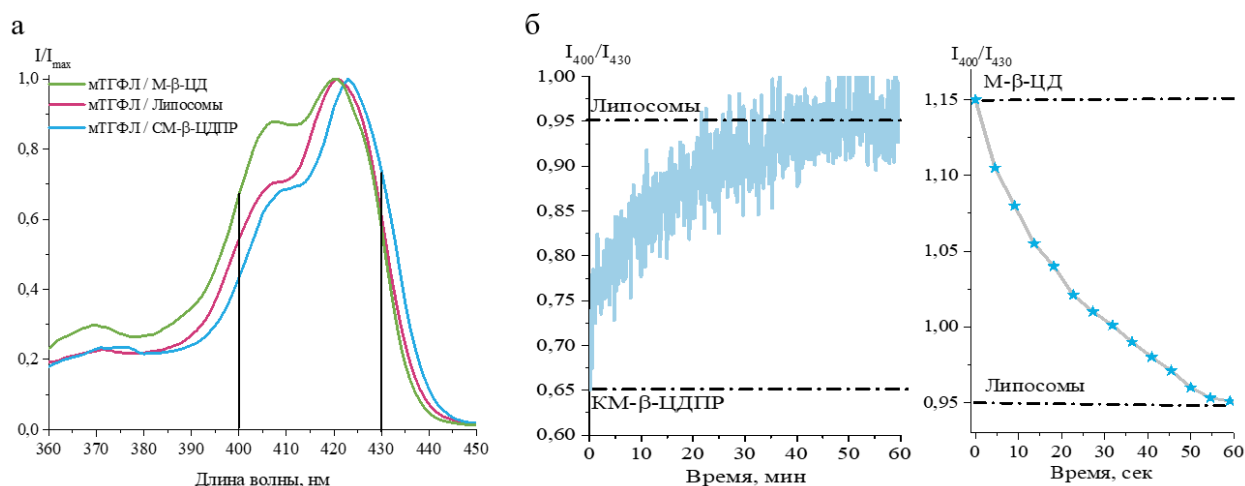
Рисунок 2 – Особенности процесса диссоциации ФС из комплексов с производными  $\beta$ -ЦД.

- а) Кинетические кривые агрегации мТГФХ при разбавлении растворов комплексов включения с мономерным и полимерным производными  $\beta$ -циклодекстрина;  
 б) Зависимость интенсивности флуоресценции в максимумах полосы Соре для мТГФХ в составе комплексов включения с полимером от разбавления ( $\tau_{\text{инк}} - 2$  ч).

Ранее проведенные исследования показали, что характерной особенностью спектральных характеристик мТГФХ при связывании с различными типами наноносителей явля-

ется изменчивость формы полосы Soret [6]. Наблюдая за изменением формы спектра для ФС, введенного в составе комплекса, в раствор липосом, можно оценивать скорость выхода пигмента из комплексов (рис. 3.а). Для количественного описания спектральных особенностей использовались отношения интенсивностей флуоресценции мТГФХ при возбуждении в различных участках полосы Soret:  $I_{400}/I_{430} = 0,65$  соответствует полному связыванию с ФС с КМ- $\beta$ -ЦДПР,  $I_{400}/I_{430} = 0,95$  свидетельствуют о нахождении мТГФХ в липидных везикулах, для М- $\beta$ -ЦД характерно отношение  $I_{400}/I_{430} = 1,15$ .

С использованием описанного подхода было показано, что скорость диссоциации ФС из комплексов мТГФХ /КМ- $\beta$ -ЦДПР в значительной мере ниже скорости диссоциации из комплексов с М- $\beta$ -ЦД (рисунок 3б). Полученные данные подтверждают вывод о более высокой устойчивости комплексов включения с полимерным  $\beta$ -ЦД по сравнению с нативным  $\beta$ -ЦД.



а) Спектры возбуждения флуоресценции мТГФХ в комплексах с производными  $\beta$ -ЦД и с липосомами;  
 б) Зависимость отношения двух длин волн  $I_{400}/I_{430}$  от времени инкубирования.

Рисунок 3 – Кинетики перераспределения мТГФХ из состава комплексов включения на липосомы.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что особенности процесса взаимодействия мТГФХ с полимерными ЦД обуславливают более высокую устойчивость и крайне низкую скорость выхода молекул ФС из комплексов с полимерными производными ЦД по сравнению с мономерными производными.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Конвергенция-2025» (задание 3.03.7.2) и ГПНИ «Биотехнологии-2» (задание 1.4.6).

#### Список литературы

1. Yakavets I. Current state of the nanoscale delivery systems for temoporfin-based photodynamic therapy: Advanced delivery strategies // J. Control Release. – 2019. – Vol. 304. – P. 268-287.
2. Cova Tania F. Cyclodextrin polymers and cyclodextrin-containing polysaccharides for water remediation // J. Polysaccharides. – 2021. – Vol. 2. – № 1. – P. 16-38.
3. Yankovsky I. Inclusion complexation with  $\beta$ -cyclodextrin derivatives alters photodynamic activity and biodistribution of meta-tetra(hydroxyphenyl)chlorin // Eur J Pharm Sci. – 2016. – Vol. 25. – P. 172-82.
4. Yang, C. A cost-effective crosslinked  $\beta$ -cyclodextrin polymer for the rapid and efficient removal of micropollutants from wastewater // Polym. Int. – 2019. – Vol. 68. – P. 805–811.
5. Wiehe A., Senge MO. The photosensitizer Temoporfin (mTHPC) - chemical, pre-clinical and clinical developments in the last decade // Photochem Photobiol. – 2023. – Vol. 99. – № 2. – P. 356-419.
6. Yankovsky I. Soret band shape indicates mTHPC distribution between  $\beta$ -cyclodextrins and serum proteins // Daes and Pigment. – 2017. – Vol. 137. – P. 299-306.

## ЗАВИСИМОСТЬ ИК ПОГЛОЩЕНИЯ СТРУКТУР $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$ ОТ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ $\text{Ti}/\text{Au}$ СЛОЁВ

<sup>1</sup>ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Методом конечных разностей во временной области получены спектры поглощения инфракрасного излучения для структур  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$  с периодически расположенными решётками  $\text{Ti}/\text{Au}$ . Обнаружено, что для таких структур характерно явление плазмонного резонанса. Установлено, что увеличение размеров решеток от 5.7 мкм до 5.9 мкм приводит к смещению пика максимального поглощения с 7.8 мкм до 8.5 мкм, при этом дальнейшее увеличение размеров не приводит к значительным изменениям в спектрах поглощения. Показано, что изменение размеров решеток практически не влияет на интенсивность пика поглощения.

### Введение

Неохлаждаемые фотодетекторы в инфракрасном диапазоне получают всё более широкое распространение благодаря компактности и невысокой цене по сравнению с охлаждаемыми аналогами. Ключевым недостатком таких фотодетекторов является меньшая чувствительность и большая подверженность шумам. Для устранения этих недостатков был разработан ряд методов увеличения поглощательной способности инфракрасных фотодетекторов; в некоторых из них используется идея плазмонной сенсбилизации [1-5]. Плазмоны представляют собой колебания электронов проводимости на границе раздела проводник/диэлектрик. Для возникновения и поддержания плазмонных колебаний в поглощающих структурах можно использовать профилированные границы раздела металлических и диэлектрических слоёв, например, в виде структур с островками или окошками микронных размеров. В таких структурах геометрия границ раздела может быть весьма значимой для максимизации поглощательной способности структур [6].

В настоящей работе проведено исследование спектров поглощения структур  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$  в зависимости от геометрических размеров структур с окошками.

### Материалы и методы

На рисунке 1 приведена схема исследуемой структуры  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$ . Между слоями  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 200 нм расположены слои  $\text{Ti}$  (20 нм) и  $\text{Au}$  (70 нм), выполненные в виде структуры с квадратными решетками: каждая размером  $L$  и с расстоянием между ними  $e = 2$  мкм (рис. 1а). Внутри решетки располагаются четыре окна размером  $h$ , заполненные нитридом кремния толщиной 90 нм (рис. 1б). Решетка и окна ограничены металлической полоской с шириной  $d$ .

В настоящей работе исследованы структуры со следующими параметрами  $d = 0.7$  мкм,  $L = 5.7$  мкм,  $h = 1.7$  мкм;  $d = 0.8$  мкм,  $L = 5.9$  мкм,  $h = 1.75$  мкм;  $d = 0.9$  мкм,  $L = 6.1$  мкм  $h = 1.8$  мкм.

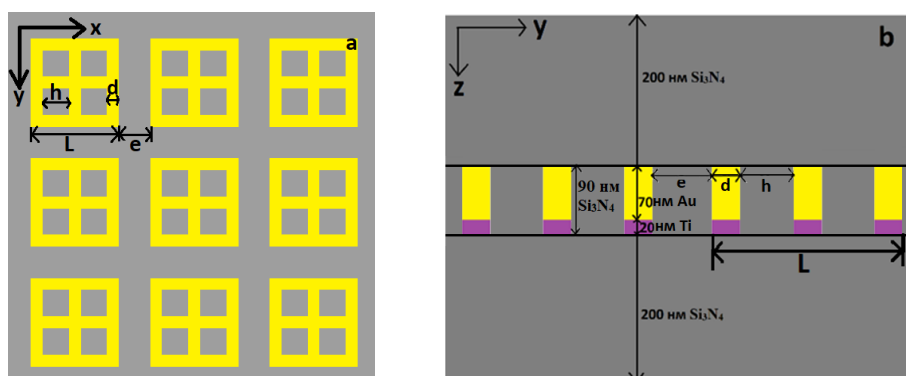


Рисунок 1 – Схема исследуемой структуры.

Моделирование проводилось методом конечных разностей во временной области в программе FDTD Solutions [7]. При моделировании над и под структурой использовались граничные условия идеально согласованных слоёв, в остальных случаях – периодические граничные условия. Под структурой  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$  на расстоянии 2.5 мкм располагалось зеркало, представляющее собой подложку Si толщиной 1 мкм со слоем Au толщиной 100 нм. Уровень поглощения был рассчитан как  $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ , где  $R(\lambda)$  - отраженное и  $T(\lambda)$  - прошедшее излучение. Оптические характеристики кремния, нитрида кремния, золота и титана взяты из базы данных программы. Было проведено моделирование отдельных пикселей с одной, четырьмя и девятью решётками.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены спектры поглощения структур  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$  с разной горизонтальной геометрией металлических слоев, а также разным количеством решёток в одном пикселе.

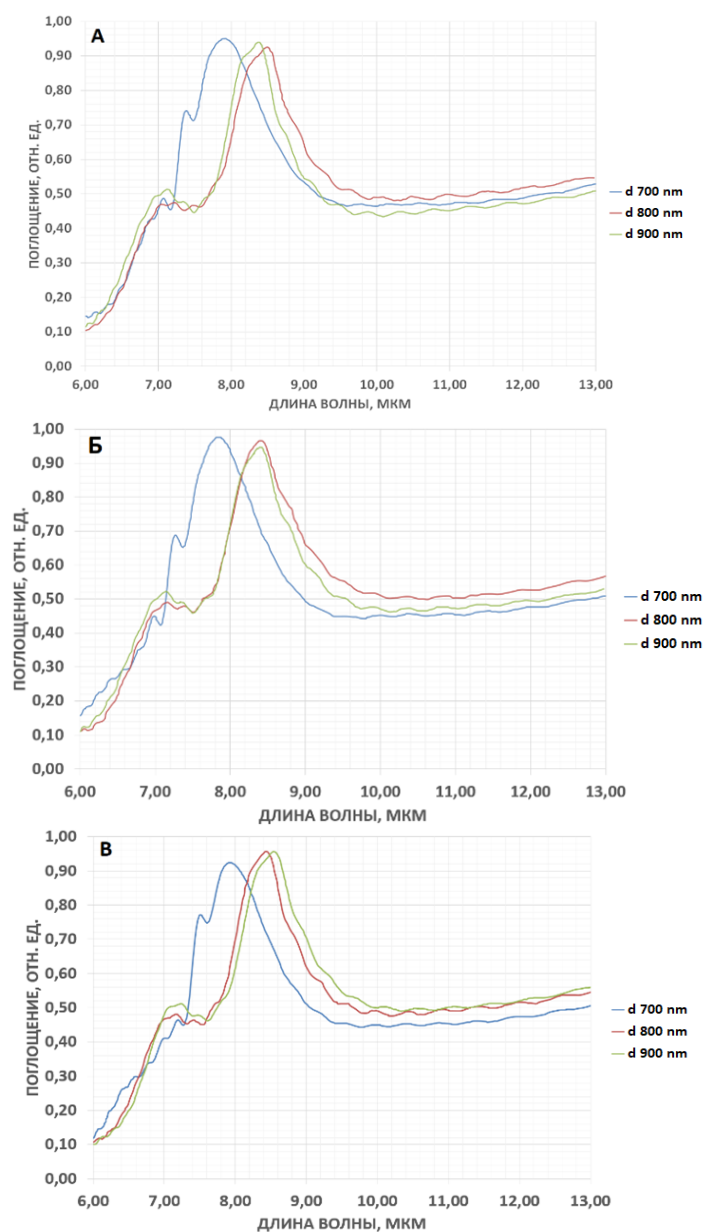


Рисунок 2 – Спектры поглощения структур  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$  а) для 9 окон, б) для 4 окно, в) для 1 окна. Трём вариантам геометрии соответствуют d 700 nm, 800 nm, 900 nm.



В спектрах поглощения всех структур присутствует пик с интенсивностью 90-95% на длине волны около 8 мкм. При этом с увеличением размеров структуры этот пик сдвигается в более длинноволновую область. Интенсивность этого пика поглощения зависит от количества решеток в пикселе. Так для пикселя с 9 и 4 решётками поглощение было выше на 3% для размера  $d = 700$  нм, однако в случае с одной решёткой поглощение возросло на 5% в структурах с  $d = 800$  нм и  $d = 900$  нм.

Мы предполагаем, что в этом диапазоне длин волн может возникать эффект плазмонного резонанса. Несмотря на то, что для золота не характерно проявление плазмонных эффектов в ИК-диапазоне, в работе [8] показано, что при определенной конфигурации золотого слоя могут возникать поверхностные или локализованные плазмоны

#### **Заключение**

В ходе выполнения работы методами численного моделирования были получены спектры поглощения структур  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4$  с различной горизонтальной геометрией металлических слоев. Показано, что в таких структурах возможно наличие плазмонного резонанса, из-за чего увеличивается интенсивность поглощения. Установлено, что увеличение размера решётки от  $d=700$  до  $d=800$  нм приводит к смещению пика поглощения с 7.8 мкм на 8.5 мкм, при этом дальнейшее увеличение  $d$  не приводит к значительным изменениям в спектрах поглощения. Показано, что изменение размеров решеток практически не влияет на интенсивность пика поглощения, которая для всех структур составила около 90–95%.

#### **Благодарности**

Исследования проводились при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта Т-22-030.

#### **Список литературы**

1. Beeman, J. W., Nyaiesh A. R., Haller, E. E., Hansen, W. L. and Garwin, E. L., "Diamond-like antireflective coatings for far infrared photoconductors," European Materials Research Society, Strasbourg, France, (1987).
2. Jayasinghe, J. A. R. C., "Multiband detectors and application of nanostructured anti-reflection coatings for improved efficiency," Ph.D. Dissertation, Georgia State University, Department of Physics and Astronomy, (2012).
3. Krenz, P. M., Tiwari, B., Szakmany, G. P., Orlov, A. O., Gonzalez, F. J., Boreman, G. D. and Porod, W., "Response increase of IR antenna-coupled thermocouple using impedance matching," IEEE Journal of Quantum Electronics 48(5), 659-664 (2012).
4. Sheng, X., Johnson, S. G., Michel, J. and Kimerling, L. C., "Optimization-based design of surface textures for thin-film Si solar cells," Optics Express 19(S4), A841-A850 (2011).
5. Unlu, M. S., Strite, S., "Resonant cavity enhanced photonic devices," Journal of Applied Physics 78(2), 607-639 (1995).
6. Mukhammad, A.I. Plasmonic-Enhanced Light Absorption in Periodic Silicon Structures: The Effect of Inter-Island Distance / A.I. Mukhammad, K.V. Chizh, V.G. Plotnichenko [et al.] // Semiconductors - 2020.-Vol. 54. - pp. 1889–1892.
7. Lumerical FDTD Solutions [Electronic resource]. / Lumerical Solutions, Inc. - 2003-2023. - Mode of access: <http://www.lumerical.com/> - Date of access :01.02.2023.
8. Erturk, O., Battal, E., Kucuk, S. E., Okyay, A. K. and Akin, T., "A plasmonically enhanced pixel structure for uncooled microbolometer detectors," Proc. of SPIE 8704, 87041E (2013).

**OBJECT BOUNDARIES DETECTION USING DIFFERENCE IMAGE METHOD**

<sup>1</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

Developed the program "X-ray Box", which calculates the intensity distribution of X-ray emission on the detector depending on the rotation angle of the object. Calculated the intensity distribution based on the rotation angle of the object and calculated new coordinates of the projective form of the object on the basis of the rotation operator. Performed numerical experiments for rectangular plates. The result of the difference survey contains positive and negative parts of the graph, which allows to determine the boundaries of the object.

For obtaining images of low absorbing X-ray objects the differential imaging method is used [1]. Principal of method is capture of two images of object at variation of angular position, and generation of differential image This method of differential imaging focused on the detection of object boundaries, which significantly change the transmittance during angular rotation of the object. This principle was laid down to the "X-ray Box" program.

"X-ray Box" program was developed in the Rad Studio 11 Alexandria Delphi programming environment. The program "X-ray Box" simulates the process of X-rays transmission through the object at a preset rotation angle and calculates the distribution of intensity on the detector. Figure 1 demonstrates the main window of the "X-ray Box" program. To run the program, we need to choose in the main window several parameters: number of steps, which are used to locate the object; rotation angle (in degrees), that shows how the object will be rotated from the initial position; object thickness and length; the intensity of emission; the linear absorption coefficient, which is determined according to the material of which the object is made and the energy of X-ray photons; log file name for saving the results of the work.

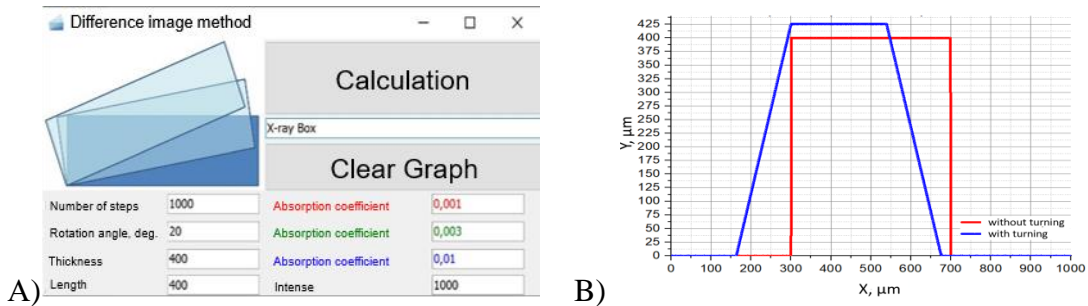


Figure 1 – Main window of the «X-ray Box» program (a) and the dependence of the thickness of the square object in rotation from the coordinate (b)

The intensity distribution of the X-ray emission on the detector, depending on the rotation angle of the object, calculated by the formula:

$$I(x, y) = I_0 e^{-\mu(\lambda) \cdot D(a_x, a_y, a_z, x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)}, \tag{1}$$

where  $I_0$  – the emission intensity of the source,  $\mu(\lambda)$  – the linear absorption coefficient of the object material in dependence on the emission wavelength  $\lambda$ ,  $D(a_x, a_y, a_z, x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$  – the thickness of the object across the vector direction  $(a_x, a_y, a_z)$  at rotation about the axis  $(x_0, y_0, z_0)$  by the angle  $(\alpha, \beta, \gamma)$ .

$D(a_x, a_y, a_z, x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$  – the object thickness in direction of vector  $(a_x, a_y, a_z)$  that defines the projective form of the object, which is calculated by the object coordinates  $F(x, y, z)$  from the set of points belongs to the boundary  $F\{ \{x_i, y_i, z_i\} \}$ . Rotation of the object provides to calculate new coordinates of the projective form of the object  $F\{X_j, Y_j, Z_j\}$  based on the rotation operator  $R(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma)$ :

$$F\{X_j, Y_j, Z_j\} = F\{ \{x_i, y_i, z_i\} \} \cdot R(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma) \tag{2}$$

Results of calculations by formulas 1 and 2 in the program "X-ray box" are shown in Figure 2. Numerical experiments were performed for rectangular plates of size 20-1000  $\mu\text{m}$ , for rotation angles from 1 to 90 degrees. By rotating the object, the thickness of the object changes, and the projective shape of the object will be presented as a trapezoid (Figure 1b, 2a). The "trapezoid" effect by rotation of the object, leads to a modification of the effective length of the object, which also results in a change of the intensity distribution.

The intensity distribution on the detector depending on the absorption coefficient of the object is shown in Figure 2. Absorption coefficients correspond to different materials:  $\text{C}_3\text{H}_6$  (polypropylene) – blue line, Cu (copper) – green line,  $\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$  (plexiglass) – red line. Increasing of the linear absorption coefficient leads to the increase of the contrast of the object boundaries in the image (Figure 2b, 2c). In the rotation of the plate, the intensity decreases, which can be characterized by some blurring of the image on the detector.

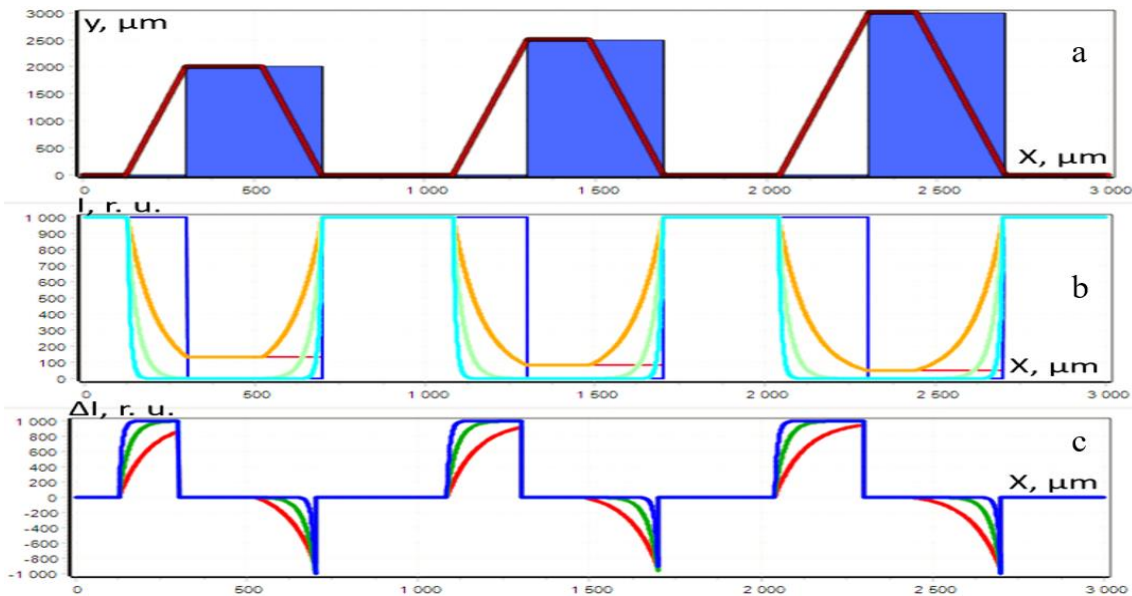


Figure 2 – Results of calculations the program "X-ray box" for the thickness 3000  $\mu\text{m}$   
 Dependence of the thickness from the coordinate (A), Distribution of X-ray intensity on the detector (B)  
 Result of difference imaging (C).

Simulations were performed with number of steps were 1000, rotation angle – 5 degrees, length – 400  $\mu\text{m}$ , intense – 1000, and three absorption coefficients: 0,001; 0,003; 0,01. Thickness was from 10 to 4000  $\mu\text{m}$ . Results of program "X-ray box" calculations are shown in Figure 2. Result of difference imaging  $\Delta I$  with peaks that determine object boundaries is shown in Figure 2c, where green line – copper, red line – plexiglass, blue line – polypropylene. As you can see, the result of difference imaging will appear at the 150-300  $\mu\text{m}$  and 550-700  $\mu\text{m}$  areas, on rotation of the object, and the dependence of image brightness will have a non-linear character. As increasing the linear absorption coefficient, the difference contrast increases (Figure 2). The result of the difference imaging contains a positive and a negative part of the graph. The positive part of  $\Delta I$  corresponds to the light elements of the image, and the negative part to the dark elements. Presence of dark and light elements increases the contrast of the image and characterizes the boundaries of the object.

The work is partly supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus within the framework of task 3.07 GPNI "Mechanics, metallurgy, diagnostics in mechanical engineering", subprogram "Technical diagnostics".

#### Reference

1. Dudchik, Yu. I. Digital X-ray radiography of low-absorbing X-ray objects / Yu. I. Dudchik, A. A. Subach // Instrumentation-2022 : materials of the 15th International Scientific and Technical Conference, 16-18 November 2022, Minsk, Republic of Belarus / editor: O. K. Gusev (Chairman) [and others]. - Minsk : BNTU, 2022. - C. 22-23.

## МЕТОД ЦВЕТОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ

<sup>1</sup>НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

A method for color visualization of X-ray spectra has been developed, which allows coloring the X-ray spectra correspondingly of energy spectra. The program "X-ray-RGB-tube" for summarizing and color visualization of X-ray spectra was developed. Simulation of the "white" source with the developed program are discussed.

Разработан метод цветовой визуализации рентгеновских спектров по энергетическим характеристикам. На основе метода разработана и создана программа «X-ray-RGB-tube» [1]. Для цветовой визуализации рентгеновского спектра и анализа спектра рентгеновского источника, каждой энергии спектра сопоставляется RGB вектор, который представляет собой значение интенсивности красного, зеленого и голубого цвета:

$$(X_1, X_2, X_3) \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – числа из диапазона от 0 до 255.

Первым шагом задавалась цветовая палитра, соответствующая рентгеновскому спектру. Диапазон энергий для рентгеновского излучения выбран от 0,1КэВ до 100 КэВ, и далее преобразован по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \min : \log_{10}(0,1\text{КэВ}) + 1 &= -1 + \log_{10}(\text{КэВ}) + 1 = 0 + \log_{10}(\text{КэВ}) \\ \max : \log_{10}(100\text{КэВ}) + 1 &= 2 + \log_{10}(\text{КэВ}) + 1 = 3 + \log_{10}(\text{КэВ}) \end{aligned} \quad (2)$$

Задана цветовая гамма для рентгеновского спектра. Диапазон энергий разбит на 7 интервалов, в соответствии с цветами радуги (оптическим спектром), которые описывают номер цвета в соответствии с интервалом. Минимальные значения RGB вектора, выходящие за диапазон, принимались за черный цвет, а максимальные – за белый.

Так как в раскладке RGB оранжевый цвет является смешением красного и желтого (оттенком), то всего основных интервалов будет меньше (рисунок 1А).

Цвет	R	G	B
Черный	0	0	0
Красный	255	0	0
Желтый	255	255	0
Зелёный	0	255	0
Голубой	0	255	255
Синий	0	0	255
Фиолетовый	255	0	255
Белый	255	255	255

А

Интервал	Переход	Энергия, КэВ
1	Ч-К	0,269
2	К-Ж	0,708
3	Ж-З	1,905
4	З-Г	5,129
5	Г-С	13,804
6	С-Ф	37,153
7	Ф-Б	100

Б

Рисунок 1 – RGB вектора цветов (А) и цветовые интервалы с их граничными энергиями(Б).

Как видно из рисунка 1А, при переходе от одного цвета к другому изменяется определённая координата RGB, тогда число шагов по оттенку составляет 255. Разбив энергетический диапазон рентгеновского излучения на интервалы в соответствии с переходами от цвета к цвету, получили граничные значения энергии, которые и будут сортировать спектральные линии по цветам (рисунок 1Б).

Рассмотрим задачу формирования «белого цвета» источника при использовании метода раскраски спектра. «Белый» источник может представлять собой либо источник со сложным анодом, либо источника, состоящего из нескольких источников, одновременно или последовательно облучающих объект в эксперименте.

Суммирование спектров как источника со сложным анодом, так и нескольких источников описывается следующим выражением:

$$I(\lambda) = \sum_i I_i(\lambda) = \sum_i k_i f(\lambda(U)) = f(\lambda(U)) \sum_i k_i = k^* \cdot \frac{(\lambda - \lambda_{\min})}{\lambda_{\min} \cdot \lambda^3}, \quad (3)$$

где  $k^*$  – константа, зависящая от параметров, не зависящая от длины волны.

Следовательно, суммируя спектральные интенсивности, получена интенсивность, которая и представляет собой суммирование функций  $f(\lambda(U))$ , зависящих от длины волны (от энергии), умноженную на константу  $k^*$ .

Тогда интегральный цвет спектра – цвет источника – будет задаваться условием смешения интенсивности. Интегрируя данный принцип в программу, получен следующий результат суммирования и цветовой визуализацией спектров с их общим цветом (цветом источника) (рисунок 2).

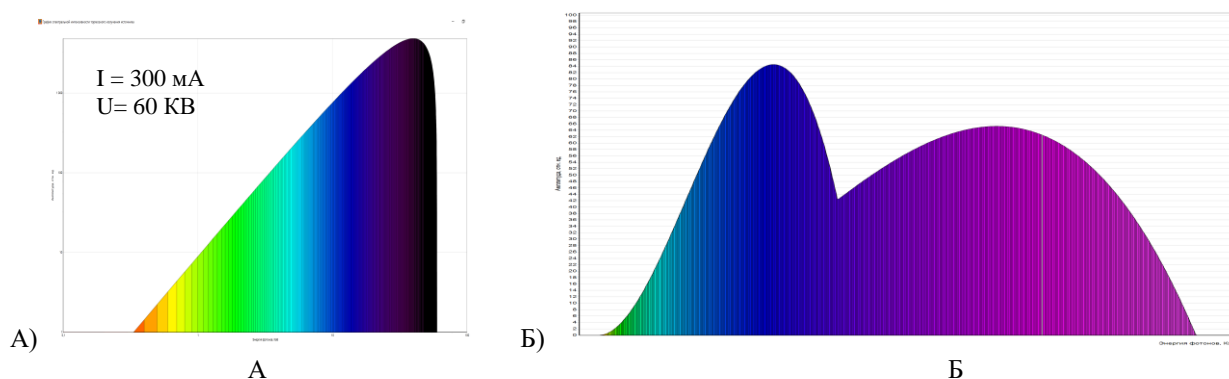


Рисунок 2 – Цветной график спектральной интенсивности тормозного спектра в логарифмическом масштабе (А) и цветной тормозной спектр модифицированной трубки (со сложным анодом) (Б).

Для создания «белого» источника, нужно получить спектр с равномерной интенсивностью. Учитывая все особенности построения и сложения спектров, в программе «X-ray-RGB-tube» было выполнено моделирование источника белого цвета (рисунок 3). Как видно из расчёта, за счёт сложения спектров интенсивностей разных источников можно получить спектр с «полочкой», где интенсивность квазилинейна.

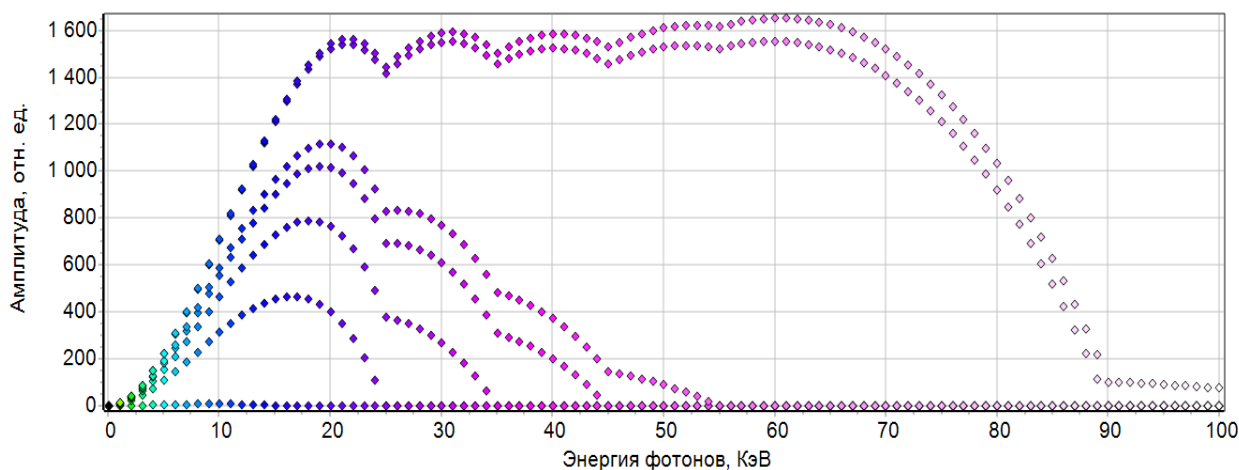


Рисунок 3 – Получение тормозного спектра «белого» источника

#### Список литературы

1. И. Н. Кольчевская, П. В. Петров, Н. Н. Кольчевский. Моделирование рентгенооптических систем// Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022) : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / БГУ ; редкол.: В. В. Скакун (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2022. – с. 217-219.

## НЕИНВАЗИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ САТУРАЦИИ ГЕМОГЛОБИНА АРТЕРИАЛЬНОЙ И ВЕНОЗНОЙ КРОВИ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Рассмотрен метод определения сатурации кислородом гемоглобина крови коры головного мозга, основанный на спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением, позволяющий эффективно разделять показатель ослабления  $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$  на показатель ослабления  $\mu_a(\lambda)$  и показатель рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$ . Приведены используемая методика измерений спектрально-пространственных профилей диффузного отражения тканей и кратко описан разработанный измеритель параметров микроциркуляторного русла системы кровоснабжения.

Одной из главных функций крови является ее газотранспортная функция, в частности – доставка кислорода к внутренним тканям и органам. Поэтому кроме концентрации общего гемоглобина (сtHb) и гематокрита (процентного содержания форменных элементов крови в ее общем объеме НСТ) важным показателем крови в живом организме является насыщенность гемоглобина, который содержится в эритроцитах, кислородом. Для ее описания используют понятие сатурации гемоглобина кислородом и обозначают  $\text{SaO}_2$  для артериальной и  $\text{SvO}_2$  для венозной крови. В медицине методы определения сатурации имеют обобщенное название – методы оксиметрии. Они базируются на разных принципах, биохимических, масспектрометрических и т.д., но в последние 20–25 лет наибольшее распространение получили оптические методы ввиду простоты их реализации, дешевизны, достаточно высокой точности, особенно *in vitro*, а также возможности проводить и прижизненные неинвазивные измерения *in vivo*. Контроль сатурации  $\text{SaO}_2$  широко используется в медицине, поскольку освоен выпуск малогабаритных двухволновых пульсоксиметров, позволяющих достаточно точно определять сатурацию гемоглобина артериальной крови по соотношению переменной  $\Delta I(\lambda)$  и постоянной  $I(\lambda)$  частей интенсивности световых потоков, регистрируемых на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , которые проходят сквозь кровенаполненную пульсирующую ткань [1]. Измерение сатурации венозной крови  $\text{SvO}_2$  *in vivo* оказалась весьма трудной задачей, несмотря на ее большую востребованность при контроле пациентов, находящихся в реанимационных отделениях. Непрерывный контроль  $\text{SaO}_2$  и  $\text{SvO}_2$  уменьшает риск неврологических осложнений, частоту развития острой недостаточности мозгового кровообращения у пациентов после кардиохирургических и иных вмешательств, позволяет сократить продолжительность их пребывания в стационаре.

Оптические методы оксиметрии основаны на способности гемоглобина по-разному поглощать оптическое излучение в видимой и инфракрасной областях спектра. Поэтому пульсоксиметры измеряют величину отношения

$$\alpha = \frac{\ln \left[ 1 + \Delta I(\lambda_1) / I_{\min}(\lambda_1) \right]}{\ln \left[ 1 + \Delta I(\lambda_2) / I_{\min}(\lambda_2) \right]}, \quad (1)$$

где  $\Delta I(\lambda_1)$  и  $\Delta I(\lambda_2)$  – амплитуда колебаний интенсивности регистрируемых фотоплетизмограмм на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , а  $I_{\min}(\lambda_1)$  и  $I_{\min}(\lambda_2)$  – минимальные значения их интенсивности. Получаемое значение  $\alpha$  далее используется для определения сатурации гемоглобина артериальной крови

$$\text{SaO}_2 = \frac{a_m^{\text{Hb}}(\lambda_1) - \alpha a_m^{\text{Hb}}(\lambda_2)}{a_m^{\text{Hb}}(\lambda_1) - a_m^{\text{HbO}_2}(\lambda_1) - \alpha \left[ a_m^{\text{Hb}}(\lambda_2) - a_m^{\text{HbO}_2}(\lambda_2) \right]}, \quad (2)$$

где  $a_m^{\text{Hb}}(\lambda_1)$ ,  $a_m^{\text{Hb}}(\lambda_2)$  и  $a_m^{\text{HbO}_2}(\lambda_1)$ ,  $a_m^{\text{HbO}_2}(\lambda_2)$  – молярные показатели поглощения светового излучения неоксигенированным и оксигенированным гемоглобином на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Измеряя интенсивность отраженного от тканей, в частности, головного мозга, светового излучения в двух участках спектра, где  $a_m^{\text{Hb}}(\lambda)$  и  $a_m^{\text{HbO}_2}(\lambda)$  различаются наиболее сильно (обычно используют  $\lambda_1 = 660$  нм и  $\lambda_2 = 940$  нм), рассчитывается сатурация артериальной крови (2).

Живые ткани состоят из разных составляющих и содержат целый набор хромофоров, каждый из которых вносит свой отдельный вклад в общее поглощение излучения биотканью на выбранной длине волны  $\lambda$ . Поэтому показатель поглощения излучения  $\mu_a(\lambda)$  биотканью представляет собой достаточно сложную функцию – сумму вкладов в общее поглощение светового излучения каждым отдельным компонентом среды. Поэтому вычленив вклад каждого отдельного компонента, который пропорционален его объемной концентрации, из результатов измерений (вычислений)  $\mu_a(\lambda)$  только на одной длине волны не представляется возможным. Необходимо уже иметь определенный набор (массив) регистрируемых данных, например, на разных длинах волн  $\lambda_i$ , и знать  $\mu_a(\lambda_i)$  каждого из хромофоров [1].

Следует также отметить, что известные методы анализа спектральных, пространственных профилей диффузного отражения (ДО) биотканей [2] либо не обеспечивают необходимой для практики точности, либо требуют больших вычислительных затрат и поэтому исключают возможность оперативной количественной интерпретации экспериментальных данных. При использовании аналитических выражений для диффузионного приближения переноса излучения в рассеивающих средах достаточно однозначно удастся определять спектральный показатель ослабления излучения  $\mu_{\text{eff}}(\lambda) = \{3\mu_a(\lambda)[\mu'_s(\lambda) + \mu_a(\lambda)]\}^{1/2}$ . Поэтому при определении объемных концентраций фракций гемоглобина Hb и HbO<sub>2</sub> обязательно придется решать задачу по разделению  $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$  на две составляющие  $\mu_a(\lambda)$  и  $\mu'_s(\lambda)$ . Существующие тканевые оксиметры, в отличие от пульсоксиметров, основаны на решении системы двух уравнений, составляемых при использовании высокочастотной модуляции светового излучения (FD) и определении зависимости фазового сдвига регистрируемых световых потоков от расстояния  $\rho$  между точкой ввода и регистрации [3].

В докладе рассматривается метод определения спектральных показателей  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  на основе спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением и модели диффузионного приближения, учитывающей потери части излучения через границу раздела [4]. При ее использовании делается предположение, что спектральный показатель приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  плавно изменяется с длиной волны и описывается степенным гиперболическим или степенным экспоненциальным законом. Тогда можно ввести соответствующие параметры, например, значение  $\mu'_s(\lambda_0)$  и показатель степени аппроксимации  $m_\lambda$  спектральной зависимости  $\mu'_s(\lambda)$  и варьировать их значениями в процессе подгонки моделируемого спектрально-пространственного профиля  $R(\lambda, \rho_k)$  к экспериментально-измеренному  $R_m(\lambda, \rho_k)$  при нескольких фиксированных расстояниях  $\rho_k$  между точкой ввода широкополосного светового излучения в ткань и точкой регистрации выходящего из ткани излучения. Поскольку для биотканей характерна существенная неоднородность регистрируемых профилей  $R_m(\lambda, \rho_k)$ , методика предусматривает их регистрацию слева и справа от точки ввода излучения в ткань, на что указывают индексы L и R в используемом выражении для функции невязки,

$$f_{\text{res}}[\lambda_i, \mu_{sL}^*(\lambda_0), m_{\lambda L}^*, \mu_{sR}^*(\lambda_0), m_{\lambda R}^*] = \sum_{k=1}^5 \left\{ \left[ \frac{R[\mu_{sL}^*(\lambda_i), \bar{\mu}_{aL}^*(\lambda_i), \rho_k]}{R_{mL}(\lambda_i, \rho_k)} - 1 \right]^2 + \left[ \frac{R[\mu_{sR}^*(\lambda_i), \bar{\mu}_{aR}^*(\lambda_i), \rho_{k+5}]}{R_{mR}(\lambda_i, \rho_{k+5})} - 1 \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

Заметим, что учет потери части излучения через границу раздела сред, осуществляемый в [4], позволяет использовать измерения профиля  $R_m(\lambda, \rho_k)$  при гораздо меньших (практически в 5 раз) расстояниях  $\rho$  между излучающим и приемным зондами, чем при использовании двунаклонного бескалибровочного метода, основанного на высокочастотной амплитудной модуляции и использовании в уравнениях только диффузионной функции Грина [3].

Корпорация Hamamatsu освоила производство миниатюрных мини-спектрометров, которые могут быть использованы при решении рассматриваемой проблемы. Производится мини-спектрометр C11708MA, который имеет объем всего несколько см<sup>3</sup> и регистрирует спектры в диапазоне от 580 до 1100 нм. На его основе нами создан макетный образец измерителя параметров микроциркуляторного русла кровоснабжения живых тканей, в том числе и усредненной сатурации гемоглобина крови. Принцип его работы основан на регистрации спектрально-пространственного профиля локального коэффициента диффузного отражения  $R(\lambda, \rho)$  и решении системы уравнений (3). Для ввода излучения используются два оптоволоконных световода, которые подводят широкополосное излучение двух галогенных ламп к точкам его ввода в ткань. Спектрометр имеет компактную схему управления, выполненную на основе микропроцессора STM32, который через USB интерфейс подключается к ноутбуку. Макет предполагается использовать при разработке методики определения сатурации гемоглобина крови в коре головного мозга для уточнения показателя поглощения  $\mu_a'(\lambda)$  обезвоженной и обезвоженной ткани коры головного мозга.

Поскольку в макете используется геометрия измерений, соответствующая спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением, изменение расстояния  $\rho_k$  между излучателями и центром входной щели C11708MA осуществляется с помощью перемещения корпуса C11708MA миниатюрным шаговым двигателем вдоль кожи головы на расстояние  $\pm 5$  мм от центрального положения. Это обеспечивает регистрацию семейства спектров диффузного отражения  $V_{mL}(\lambda_i, \rho_k)$  и  $V_{mR}(\lambda_i, \rho_k)$ , которые далее используются для расчетов  $\mu_{\text{effL}}(\lambda_i)$  и  $\mu_{\text{effR}}(\lambda_i)$ , и далее усредненных зависимостей  $\bar{\mu}_{\text{eff}}(\lambda_i)$ ,  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$ . Для минимизации влияния спектральных характеристик блоков макетного образца на регистрируемые спектры диффузного отражения  $V_{mL}(\lambda_i, \rho_k)$  и  $V_{mR}(\lambda_i, \rho_k)$ , предусмотрена нормировка получаемых спектральных зависимостей на нормированный к единице спектр диффузного отражения эталонного белого референсного отражателя WS-2 AvaSpec (Голландия).

В докладе приводятся результаты экспериментальных измерений оптических характеристик живых тканей, полученных при обработке спектрально-пространственных профилей локального коэффициента диффузного отражения  $R_m(\lambda, \rho_k)$  тканей ладони руки человека, которые зарегистрированы в районе гипотенара. Указывается, что характер поведения получаемых зависимостей показателя ослабления излучения  $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  и  $\mu'_s(\lambda)$  соответствует результатам, получаемым с помощью сложных методов, основанных на использовании высокочастотной модуляции светового излучения и временного разделения (TD).

#### Список литературы

1. Рогаткин Д. А. Физические основы оптической оксиметрии // Медицинская физика, №2, 2012. – с.97-114.
2. Лысенко С. А. Методы оптической диагностики биологических объектов. Минск: БГУ, 2014. 232 с.
3. Hueber D. M; Fantini S; Cerussi AE; Barbieri BB New optical probe designs for absolute (selfcalibrating) NIR tissue hemoglobin measurements. In Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue III; International Society for Optics and Photonics: San Jose, CA, USA, 1999; Volume 3597, pp. 618–631.
4. Фираго В. А., Шулико К. И. Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления. Положительное решение о выдаче евразийского патента по евразийской заявке № 202292115 на изобретение от 30 июня 2022 г., принятое 15.03.2023 г.



## ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОТКАНЕЙ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Рассмотрены принципы исключения влияния параметров и характеристик спектральной аппаратуры на результаты определения оптических характеристик биообъектов. Оценены возможности самокалибрующего метода определения степени насыщения коры головного мозга кислородом, включающего регистрацию сигналов диффузного отражения на двух расстояниях: вправо и влево от точки ввода оптического излучения.

Практически все оптико–физические измерения относятся к классу косвенных, заключающихся в определении искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. При этом задача обработки информации в оптико–физических измерениях подразумевает не только установление функциональных связей между получаемой информацией и определяемой характеристикой, но и интерпретацию получаемой косвенной информации об исследуемом объекте (т. е. решение обратной задачи).

В связи с этим в задаче обработки данных оптико–физических измерений необходима разработка таких способов их обработки, которые позволили бы максимально исключить априорную информацию или допущения об исследуемом объекте, необходимость внесения поправок на фон и дрейф показаний приборов, влияния окружающей среды, или иначе, методов обработки, которые базируются на концепции “безаприорности”. Суть данной концепции касательно задачи интерпретации данных оптико–физических измерений заключается в минимальном использовании априорной информации или допущений об исследуемой среде, получении опорных (калибровочных) значений определяемых параметров без проведения дополнительных независимых измерений, решении проблемы калибровочных измерений (максимальном исключении влияния характеристик аппаратуры и параметров используемых физических процессов на результаты измерений).

Важное место в оптической диагностике биообъектов занимает спектроскопия диффузного отражения (ДО) с пространственным разрешением [1–3]. В методах спектроскопии ДО с пространственным разрешением на первом этапе определяют значения оптических параметров (ОП) ткани (спектральные показатели поглощения  $\mu_a(\lambda)$  и приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda) = (1 - g)\mu_s(\lambda)$ , где  $\mu_s$  – показатель рассеяния, а  $g$  – средний косинус угла рассеяния) на длинах волн оптического зондирования путем сравнения экспериментальных и рассчитанных теоретически (в рамках модели переноса света в ткани) пространственных профилей обратного рассеяния (ОР) ткани (т. е. обратно рассеянных тканью световых потоков, регистрируемых на нескольких расстояниях от области ее облучения). При использовании диффузионного приближения достаточно однозначно удается определять спектральный показатель ослабления излучения  $\mu_{\text{eff}}(\lambda) = \{3\mu_a(\lambda)[\mu'_s(\lambda) + \mu_a(\lambda)]\}^{1/2}$ . Поэтому обязательно приходится решать задачу по разделению  $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$  на две составляющие  $\mu_a(\lambda)$  и  $\mu'_s(\lambda)$ .

На втором этапе решается обратная задача по восстановлению структурно морфологических параметров (СМП) ткани из найденных спектральных значений ее ОП. Их спектральный показатель поглощения определяется локальным суммарным значением  $\mu_a(\lambda)$  всех компонентов содержащихся в ней и слабо зависит от морфологии ткани. Показатель приведенного рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  в основном определяется морфологией ткани, т. е. ее микрофизическими параметрами, которые формирует пространственное распределение изменений показателя преломления  $n_t$  ткани.

Следует также отметить, что известные методы анализа спектральных, пространственных профилей ОР биотканей либо не обеспечивают необходимой для практики точности,

либо требуют больших вычислительных затрат и поэтому исключают возможность оперативной количественной интерпретации экспериментальных данных. Повышение точности регистрируемых сигналов требует исключения калибровочных измерений, включающих знание аппаратных констант приемо-излучающих, измерительных блоков, влияния среды на результаты измерений. Принцип исключения данных влияний («бескалибровочности») предложен впервые в [4]. Развитие данного подхода с другой геометрией измерений получил в методе самокалибровки, предложенном в [5]. Идея основана на симметричных мультидистанционных измерениях: для получения спектральной зависимости  $\mu_{\text{eff}}(\lambda_i)$  исследуемой ткани необходимо обеспечить не менее четырех измерений на каждой длине волны  $\lambda_i$  с применением двух источников и двух детекторов с симметричной конфигурацией.

В докладе анализируются возможности самокалибрующего метода определения степени насыщения коры головного мозга кислородом, основанного на регистрации сигналов диффузного отражения на двух расстояниях  $\rho_k$ , расположенных слева и справа от точки ввода широкополосного потока  $\Phi_S(\lambda)$  оптического излучения. При моделировании процесса переноса излучения в коре головного мозга применяют диффузионную функцию Грина [2,3],

$$\phi(r) = \frac{\Phi_S}{4\pi D r} e^{-\mu_{\text{eff}} r}, \quad (1)$$

где  $D = 1/[3(\mu'_s + \mu_a)]$  – диффузионная длина, на которой световое излучение ослабляется в  $e$  раз,  $r = \sqrt{z_0^2 + \rho^2}$  – расстояние между эквивалентным изотропным источником излучения, расположенным под поверхностью среды, и точкой выхода излучения из нее,  $z_0 = 3D = 1/(\mu'_s + \mu_a) \approx 1/\mu'_s$  – глубина размещения эквивалентного изотропного источника излучения, который моделирует рассеяние узкого пучка излучения, вводимого в ткань с помощью оптоволоконного зонда. Если не учитывать влияние границы раздела ткани и воздушной среды, что возможно при контакте оптоволоконных зондов с тканью (показатели преломления живых тканей и кварцевых оптоволокон различаются несильно, поэтому если плоскость площадки размещения излучателей и фотоприемников выполнена полностью из материала с показателем преломления около 1,4 и ее внешняя сторона поглощает полностью излучение, которое выходит из среды), можно записать выражение для усредненного показателя  $\bar{\mu}_{\text{eff}}(\lambda_i)$  с учетом обстоятельства, что на практике используемые расстояния  $\rho_k$  будут всегда немного отличаться друг от друга,

$$\bar{\mu}_{\text{eff}}(\lambda_i) \approx \frac{1}{\rho_{GL} - \rho_{SL} + \rho_{GR} - \rho_{SR}} \ln \left( \frac{V_m(\lambda_i, \rho_{SL}) V_m(\lambda_i, \rho_{SR}) \rho_{SL} \rho_{SR}}{V_m(\lambda_i, \rho_{GL}) V_m(\lambda_i, \rho_{GR}) \rho_{GL} \rho_{GR}} \right), \quad (2)$$

где  $\rho_G$  и  $\rho_S$  – большее и меньшее из используемых расстояний ( $L$  относится к точкам, расположенным слева от излучающего зонда, а  $R$  – справа) между точками ввода излучения в ткань и точками регистрации выходящего из ткани диффузно рассеянного излучения. Глубина размещения эквивалентного изотропного источника излучения для живых тканей небольшая, поскольку  $\mu'_s(\lambda)$  для них изменяется примерно от  $5 \text{ см}^{-1}$  при  $\lambda$  около 1000 нм до  $15\text{-}20 \text{ см}^{-1}$  в области, соответствующей сине-зеленому цвету. Поэтому при  $\rho > 20 \text{ мм}$  и соблюдении выше указанных условий можно использовать (2) для исследования сатурации гемоглобина крови коры головного мозга.

В докладе обсуждаются результаты, получаемые при использовании модели диффузионного приближения и самокалибрующегося метода для тканей руки. Приводятся соответствующие зависимости  $\mu_{\text{effL}}^*(\lambda)$  и  $\mu_{\text{effR}}^*(\lambda)$  для ткани в районе тенора ладони левой руки при использовании диффузионного приближения, а также зависимости  $\mu_{\text{effR}}^{\text{SC}}(\lambda)$ ,  $\mu_{\text{effL}}^{\text{SC}}(\lambda)$  и их усредненная зависимость  $\bar{\mu}_{\text{eff}}^{\text{SC}}(\lambda)$ , рассчитанные с использованием (2).

Показано, что при использовании модели диффузионного приближения спектральные показатели эффективного ослабления  $\mu_{\text{effL}}^*(\lambda)$  и  $\mu_{\text{effR}}^*(\lambda)$  определяются составляющими ткани на всем среднем пути, которые фотоны проходят в ткани между излучающим и приемным зондами. При использовании отношений регистрируемых спектральных зависимостей  $V_m(\lambda_i, \rho_k)$  вклад кожных покровов в получаемые спектральные показатели  $\mu_{\text{effR}}^{\text{SC}}(\lambda)$ ,  $\mu_{\text{effL}}^{\text{SC}}(\lambda)$  и  $\bar{\mu}_{\text{eff}}^{\text{SC}}(\lambda)$  небольшой, поскольку соответствующие зависимости сокращаются в процессе вычисления отношений в (2). Рассчитанные значения  $\mu_{\text{effR}}^{\text{SC}}(\lambda)$ ,  $\mu_{\text{effL}}^{\text{SC}}(\lambda)$  и  $\bar{\mu}_{\text{eff}}^{\text{SC}}(\lambda)$  соответствуют спектральным показателям эффективного ослабления более глубоких слоев ткани на участке с длиной примерно  $\rho_G - \rho_S$ , что отмечается авторами [6]. Показывается, что зависимости, полученные самокалибрующимся методом  $\mu_{\text{effR}}^{\text{SC}}(\lambda)$ ,  $\mu_{\text{effL}}^{\text{SC}}(\lambda)$  и  $\bar{\mu}_{\text{eff}}^{\text{SC}}(\lambda)$  в инфракрасной области спектра имеют меньший наклон, чем зависимости, получаемые с учетом диффузионной компоненты, т. е. по формулам (1). Это указывает на то, что при малых расстояниях, когда надо учитывать диффузионную компоненту, применение самокалибрующегося метода дает завышенные значения  $\mu_{\text{eff}}^*(\lambda)$ , т. е. его применение нецелесообразно. В настоящее время проблема учета диффузионной компоненты при небольших расстояниях между точкой ввода и точкой регистрации  $\rho_k$  в полной мере не решена.

Таким образом, при определении концентрации компонент рассеивающей среды требуется знание  $\mu_a(\lambda)$ , поэтому для адекватного решения рассматриваемой задачи нужно правильно разделять определяемую зависимость эффективного показателя ослабления светового излучения живой кровенаполненной тканью  $\mu_{\text{eff}}(\lambda) = \sqrt{3\mu_a(\lambda)[\mu_a(\lambda) + \mu'_s(\lambda)]}$  на показатель приведенного (уменьшенного или редуцированного) рассеяния  $\mu'_s(\lambda)$  и показатель поглощения  $\mu_a(\lambda)$ . Также на результаты определения сатурации гемоглобина крови коры головного мозга существенное влияние оказывает объемная концентрация воды и наклон показателя поглощения условно обескровленной ткани коры, что требует введения в измерительную аппаратуру блоков для их определения.

#### Список литературы

1. Лысенко С. А. Методы оптической диагностики биологических объектов. Минск: БГУ, 2014. 232 с.
2. Jacques S. Video reflectometry to specify optical properties of tissue in vivo / Proc. SPIE 10311, Medical Optical Tomography: Functional Imaging and Monitoring, (5 August 1993). P. 103110D-1-103110D-16; doi: 10.1117/12.2283758.
3. Doornbos R, Lang R., Aadlers M., Cross F. The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy // Physics in Medicine and Biology. 1999, Vol. 44, No 4. P. 967-981.
4. Кугейко М. М. О «бескалибровочных» оптико-физических измерениях. Измерительная техника. 1997, №9. С.35–38.
5. Hueber D. M; Fantini S; Cerussi A. E.; Barbieri B. B. New optical probe designs for absolute (selfcalibrating) NIR tissue hemoglobin measurements. In Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue III; International Society for Optics and Photonics: San Jose, CA, USA, 1999; Volume 3597, pp. 618–631.
6. Sassaroli, A., Blaney, G., Fantini, S. Dual-slope method for enhanced depth sensitivity in diffuse optical spectroscopy. J. Opt. Soc. Am. 2019. A 36, 1743– 1761.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА К ГЛАВНЫМ КОМПОНЕНТАМ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ САХАРОВ И ПЛАСТМАСС

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Разработаны многопараметрические модели классификации рафинированных тростниковых и свекловичных сахаров по спектрам оптической плотности в диапазоне длин волн от 200 до 1380 нм и классификации пяти видов пластмасс по спектрам оптической плотности в диапазоне от 1500 до 3100 нм. Выбор спектральных переменных по величине нагрузок в первую главную компоненту спектров позволил получить 100 % точность классификации 102 сахаров методом иерархического кластерного анализа и 95 % точность классификации 80 образцов пластмасс методом *k* ближайших соседей.

В настоящее время для повышения качества классификации объектов часто используют методы анализа многопараметрических спектральных данных. Целью настоящей работы является демонстрация возможностей многопараметрического спектрального анализа для качественной характеристики объектов исследования на примерах дискриминации рафинированных сахаров по типу растительного сырья для их производства и классификации видов пластмасс. Первым этапом многопараметрического анализа является сжатие данных методом главных компонент (РСА – principal component analysis) [1]. На втором этапе для качественного анализа в пространстве главных компонент применялись иерархический кластерный анализ (НСА – hierarchical cluster analysis) [2] и метод *k* ближайших соседей (*k*NN – *k* nearest neighbors) [3].

Спектры оптической плотности 25 % водных растворов сахаров были зарегистрированы на спектрофотометре Shimadzu UV-3101PC в диапазоне длин волн от 200 до 1380 нм с шагом 1 нм и шириной щели 1 нм. Из 102 исследованных образцов 45 являются растворами свекловичного сахара и 57 – тростникового. Измерения спектров пластиков проводились в диапазоне от 1500 до 3100 нм с интервалом 2 нм и шириной щели 1 нм. В данной работе исследуются пять видов пластика: полиэтилентерефталат (1), полиэтилен высокой плотности (2), полиэтилен низкой плотности (4), полипропилен (5) и полистирол (6). В рассматриваемой выборке содержатся 80 различных по толщине прозрачных и окрашенных образцов пластика.

В качестве первого метода предобработки всех спектров использовалось центрирование, приравнивающее нулю среднее по выборке образцов значение для каждой спектральной переменной. Для устранения разницы образцов пластиков по толщине было также использовано нормирование спектров. Среди рассмотренных методов (*p*-норма, масштабирование по стандартному отклонению, масштабирование по наибольшему значению, масштабирование по медианному абсолютному отклонению и другие) наилучшие результаты были получены при использовании *p*-нормировки спектров  $\tilde{v}_i = \frac{v_i}{[\sum_{i=1}^N |v_i|^p]^{1/p}}$  для  $p = 2$ , которая является евклидовой нормой и эффективно устраняет разницу в толщине образцов. Здесь  $p$  – положительное вещественное значение;  $v_i$  и  $\tilde{v}_i$  – ненормированное и нормированное значения  $i$ -ой спектральной переменной,  $i = 1 \dots N$ ,  $N$  – количество спектральных переменных.

На рисунке 1 представлены спектры нагрузок в первую главную компоненту предобработанных спектров оптической плотности сахаров и пластиков. Выбор спектральных переменных при вторичном построении пространства главных компонент, в котором проводился кластерный анализ, осуществлялся с помощью последовательного добавления переменных с уменьшающимися нагрузками. Оптимальное количество спектральных переменных (104 для сахаров, 46 для пластиков, представлены на рисунке 2) соответствует максимальной точно-

## Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии

сти классификации объектов исследования с помощью применения кластерного анализа в пространстве главных компонент спектров с выбранными переменными.

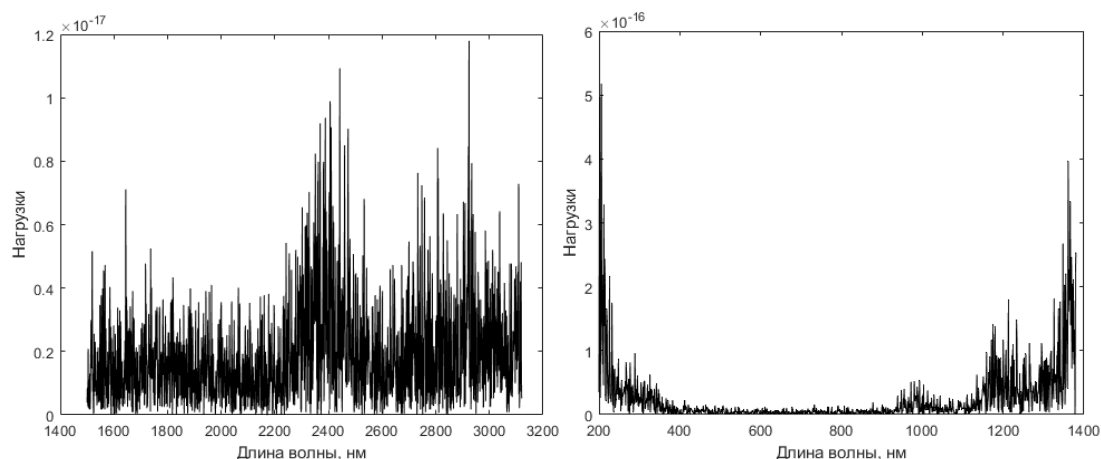


Рисунок 1 – Графики нагрузок для пластиков (слева) и сахаров (справа)

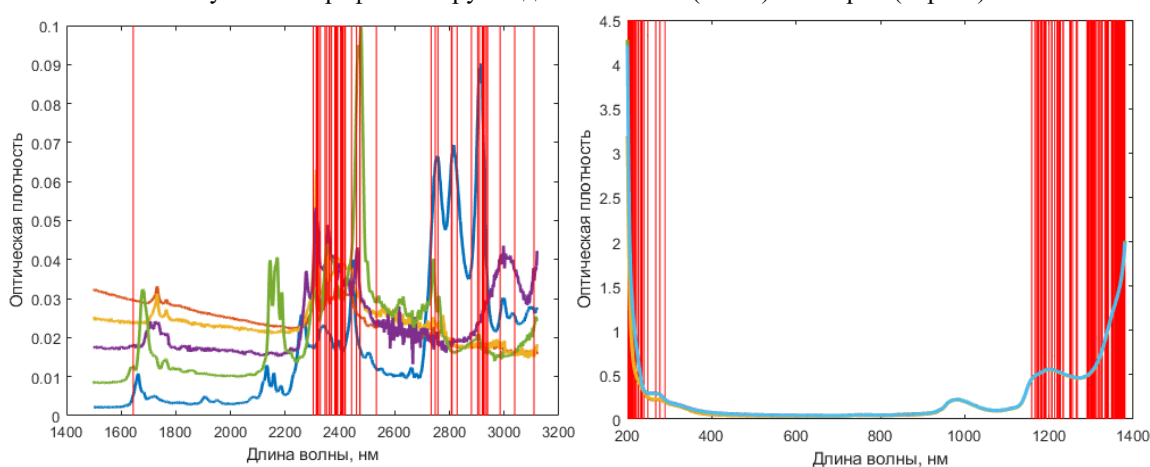


Рисунок 2 – Спектры оптической плотности и выбранные спектральные переменные для пластиков (слева) и сахаров (справа)

Для классификации свекловичных и тростниковых сахаров использован агломеративный НСА. Алгоритм рассматривает каждый объект как отдельный кластер, а затем последовательно объединяет кластера, являющиеся наиболее близкими в соответствии с выбранной метрикой пространства. На рисунке 3 изображены счета в пространстве второй, третьей и четвертой главных компонент 104 спектральных переменных из спектров оптической плотности сахаров, в котором проведена кластеризация образцов сахара агломеративным НСА при использовании метрики городских кварталов (расстояния измеряются параллельно осям координат) и 10-кратной перекрестной проверки. Точность классификации 100 %.

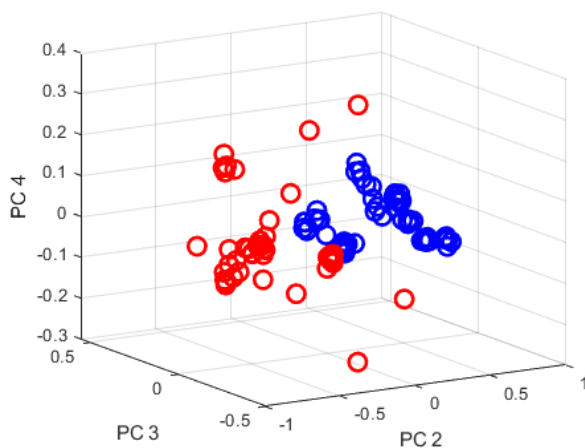


Рисунок 3 – График счетов тростниковых (красный цвет) и свекловичных (синий цвет) сахаров

Для классификации полимеров применялся метод kNN с выбором размерности пространства главных компонент при использовании евклидовой метрики. После случайной инициализации центроидов классов, присвоение членства происходит по правилу принадлежности большинства из k соседей с наименьшими расстояниями до классифицируемого объекта. Оптимизация количества учитываемых при классификации ближайших соседей (k=2) и размерности пространства главных компонент (PC1, PC2, PC3, PC4, PC6, PC10) позволила достичь 95 % точности классификации также при использовании 10-кратной перекрестной проверки. На рисунке 4 представлено двумерное пространство первой и второй главных компонент 46 спектральных переменных из спектров оптической плотности пластиков, в которых кругами отмечены 3 неправильно классифицированных образца.

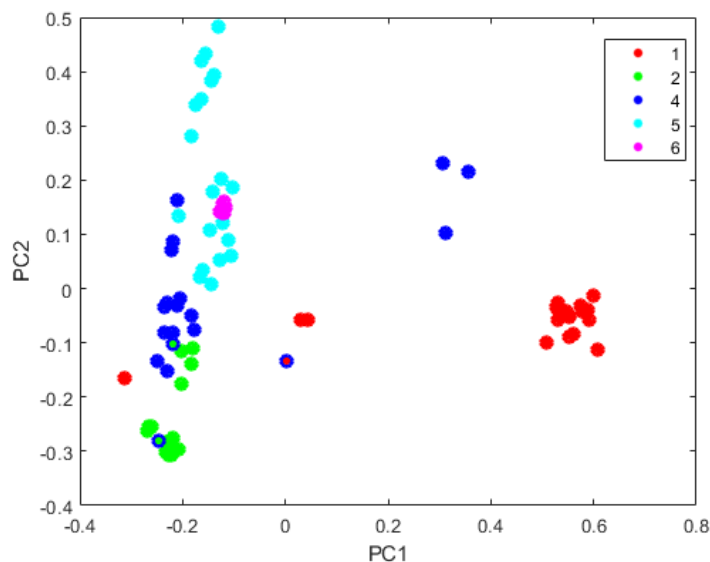


Рисунок 4 – График счетов правильно классифицированных (точки) и неправильно классифицированных (кружки) полимеров в пространстве первой и второй главных компонент 46 спектральных переменных

Высокая точность классификации исследуемых объектов на основе применения многопараметрического анализа с выбором спектральных переменных демонстрирует возможности замены стандартного дорогостоящего и трудоемкого метода релаксометрии ядерного магнитного резонанса на сравнительно дешевый и простой многопараметрический спектральный анализ при проведении классификации растительных источников при производстве рафинированных сахаров и пригодность для практического применения при предварительной сортировке пластмасс, необходимой для решения проблемы вторичного их использования.

#### Список литературы

1. Esbensen K. H., Geladi P. Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical Background, Algorithms, History, Practice // Comprehensive Chemometrics / ed.: S. Brown, R. Tauler, B. Walczak. – Elsevier, 2009. – P. 211–226.
2. Liao T. W. Clustering of time series data – a survey // Pattern Recognition. –2005. – Vol. 38. – P. 1857–1874.
3. Berrueta L. A., Alonso-Salces R. M., Héberger K. Supervised pattern recognition in food analysis // Journal of Chromatography A. – 2007. – Vol. 1158. – P. 196–214.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МЕТАЛЛЫ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В статье приводятся физические, математические и численные модели лазерно-индуцированного возбуждения акустических импульсов в металлах для изучения закономерностей распространения акустических сигналов, возбуждаемых ультракороткими лазерными импульсами различных пространственных структур. Проведено численное моделирование пространственно-временной структуры температурных полей и волн давления, возбуждаемых в металлах, в зависимости от длительности лазерных импульсов, их пространственной структуры (гауссов пучок, оптический вихрь) и теплофизических характеристик материалов.

### Введение

Изобретение лазеров как новых источников электромагнитного излучения открыло широкие возможности для изучения процессов взаимодействия интенсивного излучения с веществом. Несмотря на прошедшие 60 лет, эта область физики по-прежнему развивается быстрыми темпами. Явления взаимодействия интенсивного излучения с веществом включают в себя множество различных эффектов, часто совершенно разных по своей природе: это генерация гармоник в нелинейных кристаллах, лазерное плавление или разрушение материалов, воздействие на биологические ткани и многие другие [1]. Особенно богата физика взаимодействия интенсивного лазерного излучения с металлами [2]. В зависимости от продолжительности и интенсивности лазерного излучения характерными процессами являются нагрев, плавление и испарение материала мишени, тепловое и фотоэлектронное излучение, а также образование высокотемпературной плазмы. Соответственно, возможно реализовать различные технологические режимы воздействия лазерного излучения (резка, сварка, пробивка отверстий и т.д.). Для теоретического описания указанных явлений в соответствии с возможностями современной вычислительной техники развиваются модели различного уровня сложности, включающие решение нелинейных тепловых задач, задач описания фазовых переходов (плавление, испарение материала), гидродинамических задач, связанных как с тепловой конвекцией расплава, так и динамикой разлета плазменного облака. Взаимодействие сверхкоротких лазерных импульсов (пико- и фемтосекундной длительности) с металлами в настоящее время является областью исследований с многочисленными потенциальными или уже реализованными приложениями. За времена порядка десятков - сотен фемтосекунд происходит нагрев электронного газа с последующей релаксацией энергии возбуждения в ионную подсистему. Дальнейшая динамика ионной решетки определяется первоначальной локализацией и дальнейшим распространением акустических деформаций, имеющих характерный масштаб (единицы – десятки нанометров), связанный с глубиной проникновения излучения в металл. Генерация таких пространственно-локализованных возмущений перспективна в таких применениях, как, например, неразрушающий контроль параметров материалов в нано- и микродиапазоне.

### Теоретическая модель

Теоретическое рассмотрение взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов с металлами требует развития моделей, учитывающих существенно неравновесный характер процесса лазерного нагрева металлов. Для того, чтобы решать задачу о нагреве металла при поглощении энергии сверхкороткого лазерного импульса принято использовать так называемую двухтемпературную модель для электронного газа и ионной решетки [2]. В рамках такого подхода записываются следующие уравнения для температур электронного газа и ионной решетки:

$$\rho_e C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = k_T^e \left( \frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right) + Q_S - \gamma(T_e - T_i), \quad (1)$$

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma (T_e - T_i). \quad (2)$$

Здесь величины  $\rho$  (плотность),  $C$  (теплоемкость),  $T$  (температура),  $k_T$  (теплопроводность). С индексом “ $e$ ” относятся к электронной подсистеме, а с индексом “ $i$ ” – к ионной. Параметр  $\gamma$  определяет скорость релаксации энергии от электронного газа к ионам кристаллической решетки. Величина  $Q_S$  определяется источником энерговыделения:  $Q_S = \kappa I_0 \frac{t}{\tau_p} e^{-t/\tau_p}$ , где  $I_0$  интенсивность светового пучка,  $\kappa$  коэффициент поглощения среды, и  $\tau_p$  длительность лазерного импульса. При воздействии импульсного лазерного излучения на поглощающую среду происходит ее локальный нагрев, расширение и генерация акустического импульса. Эти процессы могут быть эффективно смоделированы путем численного решения уравнений движения среды в форме Лагранжа.

Уравнения непрерывности имеет вид:

$$V = V_0 \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial x_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial y_e}{\partial y_1} \frac{\partial z_e}{\partial z_1} - \frac{\partial y_e}{\partial z_1} \frac{\partial z_e}{\partial y_1} \right) - \\ - \frac{\partial y_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial x_e}{\partial y_1} \frac{\partial z_e}{\partial z_1} - \frac{\partial x_e}{\partial z_1} \frac{\partial z_e}{\partial y_1} \right) + \frac{\partial z_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial x_e}{\partial y_1} \frac{\partial y_e}{\partial z_1} - \frac{\partial x_e}{\partial z_1} \frac{\partial y_e}{\partial y_1} \right) \end{array} \right], \quad (3)$$

где,  $V_0 = 1/\rho_0$ ,  $V = 1/\rho$  - начальный и текущий удельные объемы;  $(x_1, y_1, z_1)$  – лагранжевы координаты;  $(x_e, y_e, z_e)$  – эйлеровы координаты.

Уравнения движения в предположении отсутствия внешних сил записываются в виде:

$$\frac{\partial u_{x_e}}{\partial t} = -V_0 \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x_1} \left( \frac{\partial y_e}{\partial y_1} \frac{\partial z_e}{\partial z_1} - \frac{\partial y_e}{\partial z_1} \frac{\partial z_e}{\partial y_1} \right) - \\ - \frac{\partial y_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial P}{\partial y_1} \frac{\partial z_e}{\partial z_1} - \frac{\partial P}{\partial z_1} \frac{\partial z_e}{\partial y_1} \right) + \frac{\partial z_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial P}{\partial y_1} \frac{\partial y_e}{\partial z_1} - \frac{\partial P}{\partial z_1} \frac{\partial y_e}{\partial y_1} \right) \end{array} \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_{y_e}}{\partial t} = -V_0 \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial x_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial P}{\partial y_1} \frac{\partial z_e}{\partial z_1} - \frac{\partial P}{\partial z_1} \frac{\partial z_e}{\partial y_1} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_1} \left( \frac{\partial x_e}{\partial y_1} \frac{\partial z_e}{\partial z_1} - \frac{\partial x_e}{\partial z_1} \frac{\partial z_e}{\partial y_1} \right) + \\ + \frac{\partial z_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial x_e}{\partial y_1} \frac{\partial P}{\partial z_1} - \frac{\partial x_e}{\partial z_1} \frac{\partial P}{\partial y_1} \right) \end{array} \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_{z_e}}{\partial t} = -V_0 \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial x_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial y_e}{\partial y_1} \frac{\partial P}{\partial z_1} - \frac{\partial y_e}{\partial z_1} \frac{\partial P}{\partial y_1} \right) - \frac{\partial y_e}{\partial x_1} \left( \frac{\partial x_e}{\partial y_1} \frac{\partial P}{\partial z_1} - \frac{\partial x_e}{\partial z_1} \frac{\partial P}{\partial y_1} \right) + \\ + \frac{\partial P}{\partial x_1} \left( \frac{\partial x_e}{\partial y_1} \frac{\partial y_e}{\partial z_1} - \frac{\partial x_e}{\partial z_1} \frac{\partial y_e}{\partial y_1} \right) \end{array} \right]. \quad (6)$$

Уравнения изменения эйлеровых координат записываются следующим образом:

$$u_{x_e} = \frac{\partial x_e}{\partial t}, \quad u_{y_e} = \frac{\partial y_e}{\partial t}, \quad u_{z_e} = \frac{\partial z_e}{\partial t}. \quad (7)$$

В качестве уравнения состояния используем уравнение Ми-Грюнайзена [3]:

$$P = \rho_{i0} u_0^2 \left( 1 - \frac{V_i}{V_{i0}} \right) + \Gamma_i \frac{C_i (T_i - T_0)}{V_i} + \Gamma_e \frac{C_e (T_e - T_0)}{V_e}, \quad (8)$$

где  $V_{i0}$ ,  $V_{i,e}$  начальный и текущий объемы,  $V_{i0} = 1/\rho_{i0}$ ,  $V_{i,e} = 1/\rho_{i,e}$ , где  $\rho_{i0}$ ,  $\rho_{i,e}$  соответствующие плотности,  $\Gamma_{i,e}$  коэффициенты Грюнайзена,  $u_0$  скорость распространения звука в металле.



**Результаты и обсуждение**

При моделировании использовались теплофизические характеристики металлов (золото, никель), приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Теплофизические и акустические характеристики рассматриваемых металлов.

	Au	Ni
$C_e$ , Дж/см <sup>3</sup> К	$5.472 \cdot 10^{-2}$	$2.733 \cdot 10^{-2}$
$k_T^e$ , Вт/см К	3.115	0.90
$\Gamma_e$	1.5	1.5
$\gamma$ , Вт/см <sup>3</sup> К	$2.5 \cdot 10^{10}$	$4.05 \cdot 10^{12}$
$C_i$ , Дж/см <sup>3</sup> К	2.550	3.910
$\Gamma_i$	1.11	1.83
$u_S$ , см/с	$3.24 \cdot 10^5$	$5.63 \cdot 10^5$

Выбор этих двух металлов обусловлен значительной разницей в параметрах, характеризующих скорость релаксации энергии возбуждения электронов в ионной решетке, коэффициент теплопроводности и скорость звука. Большие значения коэффициента электрон-фононной релаксации в никеле одновременно с более низким значением коэффициента теплопроводности и более высоким значением скорости звука позволяют рассчитывать на более эффективное возбуждение акустических импульсов в никеле, поскольку первоначально нагретый объем при этих условиях должен быть меньше, и, следовательно, можно ожидать образования более резкого фронта волны сжатия. Проведены численные эксперименты по расчету структуры акустического импульса, генерируемого в металлическом слое, для различных типов лазерных пучков (гауссов пучок, оптический вихрь). Пространственное распределение температуры и давления после окончания лазерного импульса показано на рисунках 1 и 2.

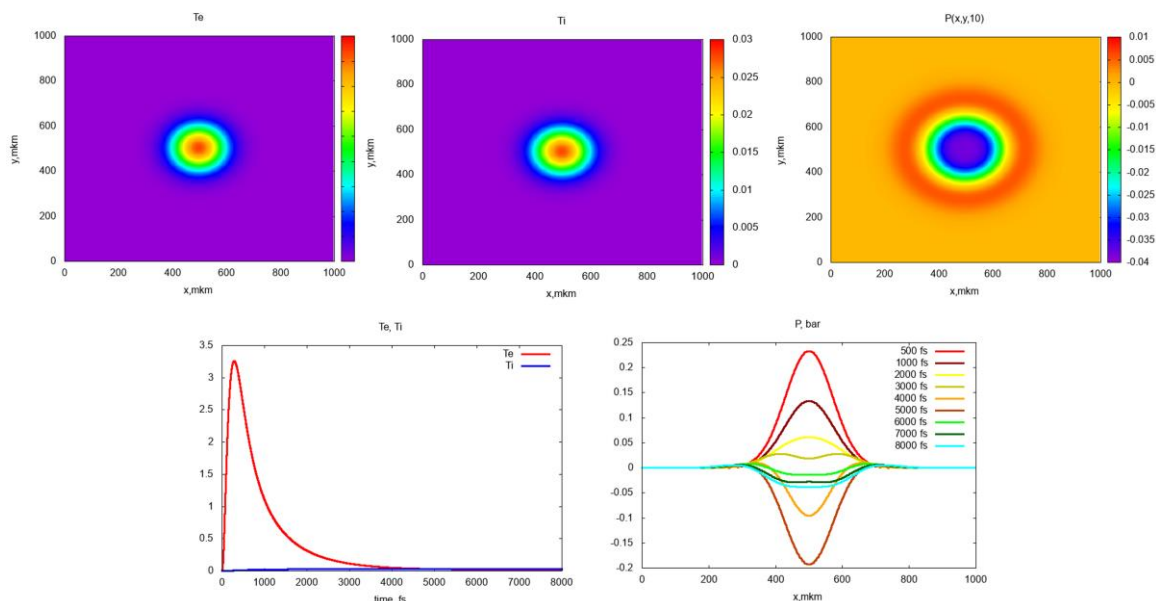


Рисунок 1 – Графики распределения температуры электронного газа, температуры ионной решетки, давления в приповерхностном слое золота в сечении, перпендикулярном направлению распространения гауссового светового пучка

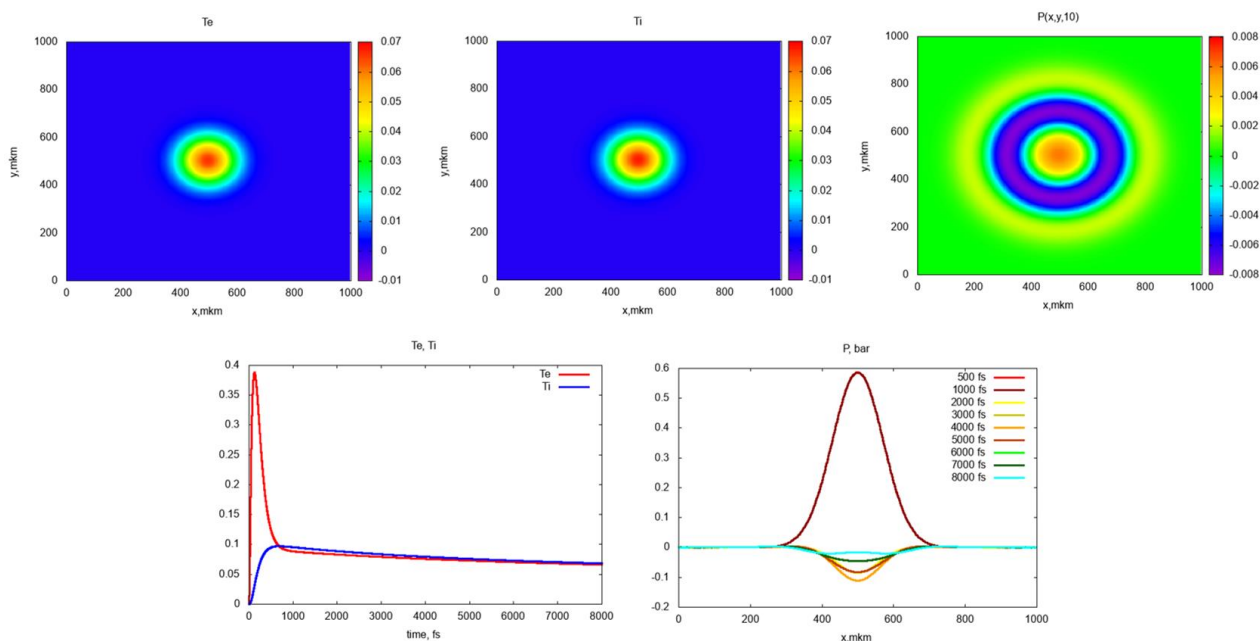


Рисунок 2 – Графики распределения температуры электронного газа, температуры ионной решетки, давления в приповерхностном слое никеля в сечении, перпендикулярном направлению распространения гауссова светового пучка

Как следует из тестового расчета для одномерной геометрии задачи при используемых параметрах золота установление температурного равновесия двух подсистем (электронной и ионной) происходит за время порядка 4 пс, а никеля – за 1 пс.

### Заключение

Разработанная модель позволяет оценить результаты термомеханического воздействия ультракоротких лазерных импульсов на металлические слои. Данная модель основана на двухтемпературной модели для электронного газа и ионной решетки, а также на уравнениях движения сплошных сред в форме Лагранжа и уравнении состояния Ми-Грюнайзена.

### Список литературы

1. Дж. Рэди. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир. 1974. 468с.
2. С. И. Анисимов, Я. А. Имас, Г. С. Романов, Ю. В. Ходыко. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. – 272с.
3. О. Г. Романов, Г. И. Желтов, Г. С. Романов. Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на металлические наночастицы в жидкости // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. Т.75. – № 12. С.1691-1693.

## ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ ВТОРЫХ ПОРЯДКОВ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВСС

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, – Минск, Беларусь

<sup>2</sup> ПАО РКК «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв, Российская Федерация

Видеоспектральная система ВСС предназначена для проведения измерений характеристик отраженного излучения подстилающих поверхностей в диапазоне длин волн от 400 до 950 нм на Российском сегменте Международной космической станции. Отличительной особенностью ВСС является использование спектрометров на дифракционной решетке, в которых происходит искажение длинноволновой области спектра вторым порядком дифракции коротковолнового излучения. Применение алгоритма коррекции вторых порядков дифракции для ВСС показало возможность математического устранения наложения вторых порядков дифракции с точностью не хуже 4 % от интенсивности полезного сигнала.

Научная аппаратура «Видеоспектральная система» (НА ВСС) [1] предназначена для проведения научно-прикладных исследований в космическом эксперименте (КЭ) «Экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф» («Ураган») с борта Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). ВСС состоит из фотоаппарата высокого пространственного разрешения и трех спектрометров на спектральный диапазон 400-900 нм. Для обеспечения одновременной регистрации изображения и спектров отражения подстилающей поверхности в ВСС применяется общий входной объектив Hasselblad HC 4,5/300 со встроенным электро-механическим затвором.

Регистрируемое излучение через входной объектив поступает на светоделитель и делится на две части – часть излучения направляется и фокусируется на цветную фотоприемную матрицу фотоаппарата, вторая часть фокусируется на входные торцы оптоволокон изображения, выходные торцы которых расположены в соответствующих плоскостях входных щелей трех спектрометров.

Каждый из трех спектрометров построен по схеме Роуланда на вогнутой дифракционной решетке. Отличительной особенностью такой оптической схемы является наложение порядков дифракции от «синей» области на «красную», что приводит к искажению регистрируемого сигнала в красной области. При отсутствии аппаратных методов коррекции наложения порядков дифракции, возможно применение математических методов коррекции. Разработанный авторами алгоритм [2] программной коррекции заключается в представлении зарегистрированного спектрометром сигнала в «синей» области в виде сумм Гауссиан, параметры которых определяются экспериментально для отдельных длин волн с последующей численной интерполяцией на сетку длин волн. Затем найденные функции преобразуются в свои образы (аппаратные функции второго порядка дифракции) в соответствии с интерполированными значениями, полученными для параметризации Гауссиан. На последнем этапе производится вычитание алгебраической суммы рассчитанных образов из искаженного спектра.

Особенностью спектрометров ВСС, исследуемых в данной работе, являются: спектральное разрешение около 4 нм, разрядность оцифровки сигнала 8 бит и относительно высокий уровень собственного шума детектора.

Результаты применения алгоритма коррекции спектра яркости неба для одного из спектрометров представлены на рисунке 1а. В диапазоне длин волн 790–810 нм наблюдается недостаточная степень коррекции, связанная с малым числом точек для аппроксимации функции преобразования Гауссиан в свои образы.

Проверка работоспособности алгоритма осуществлялась путем сравнения восстановленного спектра  $I_{корр}(\lambda)$  протяженного объекта со спектром  $I_{КС-10}(\lambda)$  того же объекта, заре-

гистрированным с использованием аппаратной фильтрации вторых порядков. В настоящей работе аппаратная фильтрация проводилась при помощи цветного стекла КС-10, пропускающего излучение с длиной волны от 650 нм.

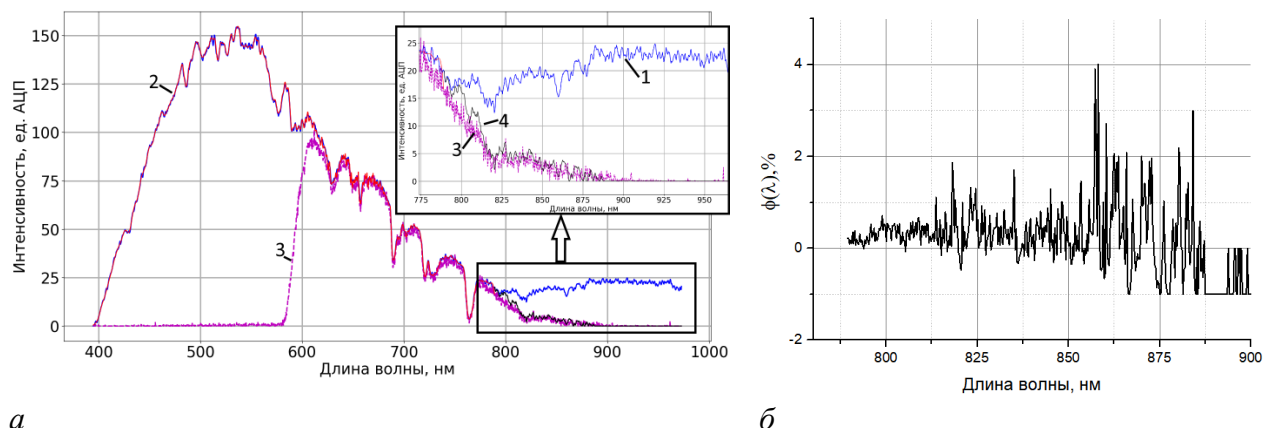


Рисунок 1 – Результат коррекции наложения вторых порядков дифракции спектра яркости неба на примере одного из спектрометров ВСС:

*a* – этапы алгоритма коррекции: 1 – исходный спектр; 2 – результат представления первого порядка дифракции в виде суммы Гауссиан; 3 – спектр яркости неба с аппаратной коррекцией (фильтр КС-10); 4 – результат коррекции;  
*б* – оценка точности алгоритма коррекции

Таким образом, использование цветного стекла КС-10 гарантирует удаление синей части спектра, способного создать второй порядок дифракции. Тогда невязку  $\varphi(\lambda)$ , представляющую собой оценку точности алгоритма коррекции, можно рассчитать следующим образом:

$$\varphi(\lambda) = \frac{I_{\text{корр}}(\lambda) - I_{\text{КС-10}}(\lambda)}{I_{\text{КС-10}}(\lambda)} \cdot 100\%$$

Из рисунка 1б можно заметить, что невязка  $\varphi(\lambda)$  составляет не более 4 % от уровня полезного сигнала, причем ее наибольшие амплитуды находятся в области малой спектральной чувствительности детектора, что можно объяснить низким значением отношения сигнал-шум. Стоит отметить, что невязка сопоставима с уровнем собственного шума детектора в большей части корректируемой области.

### Заключение

Таким образом, в работе представлены первые результаты применения алгоритма коррекции вторых порядков дифракции в применении к данным видеоспектральной системы ВСС. Проведенные исследования показывают принципиальную возможность устранения эффекта наложения порядков дифракции с точностью не хуже 4 % и создают предпосылки к увеличению качества спектральных данных, получаемых при помощи ВСС.

### Список литературы

1. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э., Гусев В. Ф., Десинов Л. В., Иванов В. А., Крот Ю. А., Мартинов А. О., Рязанцев В. В., Сосенко В. А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии – 2016, № 2 (13). – С. 70–79.
2. Бручковская С. И., Литвинович Г. С., Бручковский И. И., Катковский Л. В. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой. // Журн. приклад. спектроскопии. – Минск, 2019. – Т. 86, №4. – С. 620–627.

УДК 54.058+544.72.02

Луговский А. П.<sup>1</sup>, Пархоменко В. А.<sup>2</sup>, Луговский А. А.<sup>2</sup>, Тарасов Д. С.<sup>1</sup>,  
Гусаков Г. А.<sup>1</sup>, Белько Н. В.<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЬЮГАТОВ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА И КРАСИТЕЛЕЙ СТИРИЛОВОГО, ЦИАНИНОВОГО И ДИЦИАНОМЕТИЛЕНПИРАНОВОГО РЯДОВ

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь  
<sup>2</sup>Учреждение БГУ «Республиканский центр проблем человека», Минск, Беларусь

В сфере биомедицинских исследований в настоящее время ведутся работы по повышению чувствительности флуоресцентных методов анализа, а также увеличения селективности биораспределения в тканях организма биологически активных веществ, вводимых в составе систем доставки лекарств. В настоящей работе разработан подход к синтезу комплексов флуоресцентных красителей с детонационным наноалмазом, которые могут быть использованы в этой области, изучены их оптические свойства и показана возможность биомедицинского применения.

Детонационные наноалмазы (ДНА) – перспективная основа наноконъюгатов для биомедицинского применения, что обуславливается их высокой биосовместимостью, низкой токсичностью и возможностью в широких пределах модифицировать состав поверхности. Способность частиц с размерами до 100 нм проникать в клетки без проявления цито- и генотоксических эффектов позволяет создавать на основе ДНА наноконъюгаты с биологически активными и лекарственными веществами, а также биомаркерами. Так, особое внимание уделяется разработке люминесцентных зондов – частиц ДНА с привитыми флуоресцентными красителями, используемыми в качестве маркеров на разнообразные биомолекулы. Применение подобных конъюгатов повышает чувствительность анализа и позволяет управлять биораспределением действующего вещества [1].

Для изучения свойств описанных комплексов были синтезированы конъюгаты ДНА со стироловым (рисунок 1, формула К1), полицианиновым (К2) и дицианометиленипираниновым (К3) красителем. Ковалентное связывание молекул красителя (К) с наночастицами алмаза (ДНА) осуществлено посредством гексаметилендиаминового (ГМДА) линкера по схеме на рис.2; массовая доля красителей в образцах комплексов составляет 5%. Порошки ДНА предварительно подвергались термоокислительной обработке с целью монофункционализации и увеличения содержания карбоксильных групп на поверхности наночастиц [2]. Изменение состава порошков в процессе модификации и прививки – окисление поверхности, присоединение молекулы линкера, образование амидной связи с молекулами красителей – подтверждалось методом ИК-спектроскопии. Для исследования оптических свойств наноконъюгатов были приготовлены водные и этанольные суспензии синтезированных образцов с концентрацией золей 1 мг/мл. Спектры поглощения суспензий ДНА-К1 и ДНА-К2 приведены на рисунке 3.

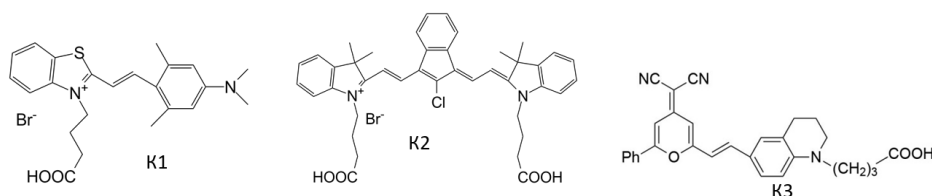


Рисунок 1 – Структурные формулы используемых красителей

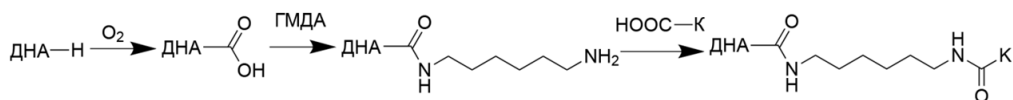


Рисунок 2 – Схема синтеза наноконъюгатов. ДНА – наноалмаз, К – краситель

Спектры всех образцов представляют собой спектры поглощения соответствующего красителя, наложенные на характерный спектр высокодисперсной суспензии ДНА; красители не проявляют сольватохромный эффект, и полосы поглощения всех красителей имеют одинаковое положение как в воде, так в этаноле. У конъюгата ДНА-К1 полоса поглощения красителя находится в области 500–600 нм, а у ДНА-К2 – в области 650–800 нм. Наблюдаемые двойные полосы при 670 и 734 нм в случае ДНА-К2 обусловлены димеризацией красителя из-за возможной агрегации наночастиц комплекса.

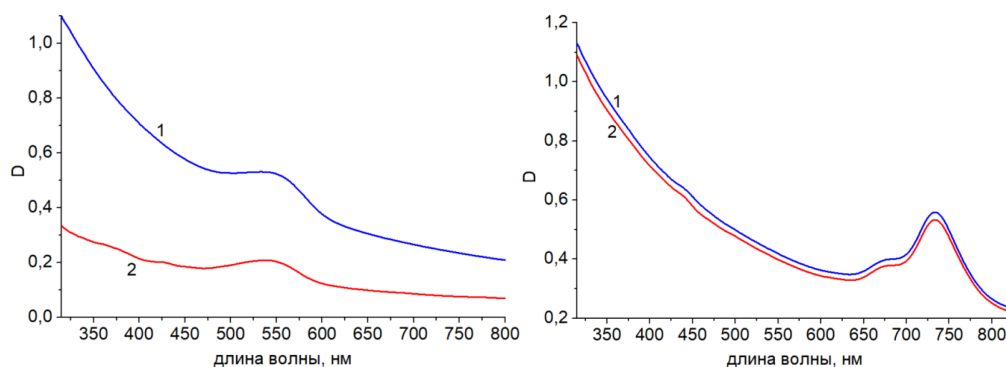


Рисунок 3 – Спектры поглощения наноконкомплексов ДНА-К1 (слева) и ДНА-К2 (справа) в этаноле, зарегистрированные сразу после приготовления (1) и спустя 2 ч (2).

Водные суспензии конъюгата ДНА-К1 обладают высокой седиментационной устойчивостью и не коагулируют в течение нескольких часов. Тем не менее, в этаноле наблюдается существенное убывание оптической плотности со временем в связи с коагуляцией золя. В случае ДНА-К2 как водная, так и спиртовая суспензии характеризуются высокой седиментационной стабильностью. Наблюдаемое различие в устойчивости объясняется, по всей видимости, наличием двух карбоксильных групп в структуре К2, препятствующих агрегации из-за увеличенной сольватации наночастиц и стабилизации слоя противоионов. Этанол, в свою очередь, из-за меньшей, по сравнению с водой, полярности также не способствует седиментационной устойчивости ДНА-К1. Следовательно, для повышения стабильности суспензий требуется увеличение концентрации полярных групп на поверхности наночастиц, что может быть достигнуто дополнительной окислительной обработкой.

Положение полос и форма спектров возбуждения и флуоресценции близки для суспензий наноконкомплексов в этаноле и воде. В спектре флуоресценции ДНА-К1 проявляется полоса при 597 нм, а в спектре возбуждения – соответствующая ей полоса при 517 нм (рисунок 3а). В спектре флуоресценции суспензии наноконкомплексов ДНА-К2 проявляется полоса при 758 нм, а в спектре возбуждения флуоресценции – полоса при 729 нм (Рисунок 3б). Указанные полосы могут быть отнесены к мономерам красителя, ковалентно связанного с поверхностью наночастиц [3]. При этом интенсивность флуоресценции полученных конъюгатов в целом ниже, чем флуоресценция самих красителей.

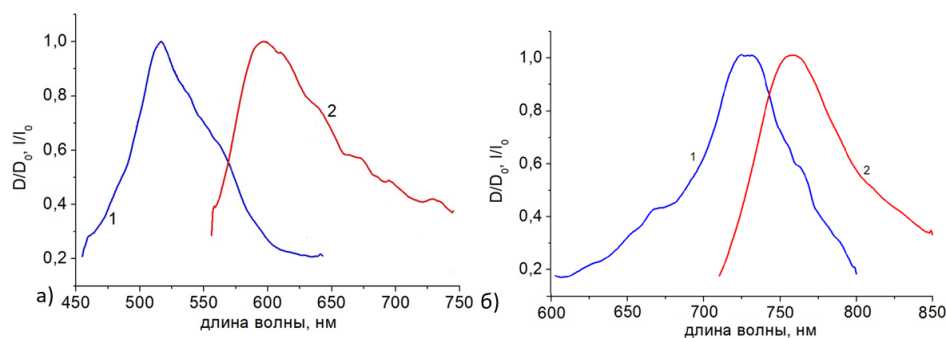


Рисунок 4 – Нормированные спектры возбуждения флуоресценции при регистрации на 660 нм (1) и флуоресценции при возбуждении на 540 нм (2) наноконкомплексов ДНА-К1 (а) и нормированные спектры возбуждения флуоресценции при регистрации на 810 нм (1) и флуоресценции при возбуждении на 700 нм (2) наноконкомплексов ДНА-К2 (б)

Спектр люминесценции комплекса ДНА-КЗ содержит слабую широкую полосу с максимумом 660 нм, характерную для исходного красителя, наложенную на фоновое рэлеевское рассеяние на суспензии ДНА. Наблюдаемое уширение полосы обуславливается, с одной стороны, случайным взаимодействием молекул красителя между собой при агрегации наночастиц. В результате хромофоры оказываются в среде с непостоянной полярностью и поляризуемостью. С другой стороны, из-за гибкости алифатической цепи линкера возможно сближение хромофора с поверхностью наночастицы, что также модулирует диэлектрическую проницаемость среды от 5 (алмаз) до 80 (вода). Этими же причинами объясняется также пониженная интенсивность люминесценции красителей в составе комплексов. Возможное увеличение флуоресценции может быть получено за счет изменения длины углеводородного фрагмента, соединяющего краситель с поверхностью детонационного наноалмаза.

Таким образом, полученные наноконструкции детонационного ультрадисперсного алмаза с молекулами стирилового, цианинового и дицианометиленпиранового красителей, несмотря на низкое содержание собственно флуоресцентной метки, демонстрируют удовлетворительные физико-химические и оптические свойства, пригодные для биомедицинских применений.

#### Список литературы

1. Chauhan S. Nanodiamonds with powerful ability for drug delivery and biomedical applications: Recent updates on in vivo study and patents / S. Chauhan, N. G. Jain, U. Nagaich // J. Pharm. Anal. – 2020. – Vol. 10, №1. – P. 1-12.

2. Гусаков Г. А., Луговский А. А., Самцов М. П., Пархоменко В. А., Азарко И. И. Процессы окисления ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза при обработке на воздухе // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния». Материалы V междунар научно-практической конференции; 16-17 мая 2019 г., Минск, М-во обр. РБ, НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ, под ред. В. И. Попечиц – Минск: 2019. С.30-32.

3. Белько Н. В., Самцов М. П., Гусаков Г. А., Луговский А. П., Луговский А. А., Пархоменко В. А., Воропай Е. С. Оптические свойства комплексов ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза с индотрикарбоцианиновым красителем // Доклады БГУИР – 2018. – Т. 117, № 7. - С. 101-105.

УДК 528.8

Мартинов А. О.<sup>1</sup>, Гуляева С. И.<sup>1</sup>, Литвинович Г. С.<sup>1</sup>,  
Бручковский И. И.<sup>1</sup>, Юрина О. А.<sup>2</sup>, Смоленцева Л. А.<sup>2</sup>

## ПРОГРАММНАЯ КОРРЕКЦИЯ УДВОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВСС

<sup>1</sup> Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> ПАО РКК «Энергия» имени С.П. Королёва, г. Королёв, Российская Федерация

В работе представлен метод коррекции двухкратного паразитного отражения, возникающего на изображениях ВСС в виде двоящегося изображения. Проведено исследование формирования «призраков» на изображениях ВСС на оптическом стенде при помощи съемки лазерного светодиода. Разработан программный метод коррекции «призраков» на изображения и оценена его эффективность.

Разработанная в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ по заказу ПАО «РКК «Энергия» видеоспектральная система ВСС [1], представляет собой устройство, позволяющее получать фотоизображения с одновременной регистрацией более сотни пространственно разрешенных спектров отраженного излучения подстилающих поверхностей в видимом и ближнем ИК диапазоне с разрешением 2–5 нм. ВСС предназначен для проведения научно-прикладных исследований в космическом эксперименте «Ураган» с борта Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). Особенностью ВСС является используемая соосная схема: с помощью светоделителя (полупрозрачная плоскопараллельная пластина) световой поток, спроецированный объективом, разделяется на два. Один из них проецируется на приемную матрицу блока изображений, а второй используется для формирования трех областей спектрометрирования. В использовании оптических систем со светоделителем возникает проблема двухкратного отражения от граней светоделителя (рисунок 1), что приводит к появлению «призраков» в изображении (англ. ghost reflection). У ВСС это проявляется в виде двоящегося изображения фотокамеры.

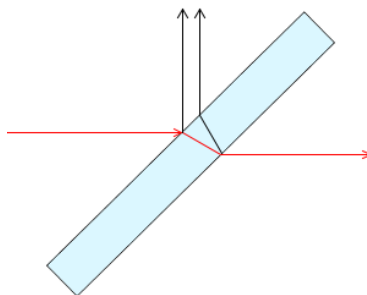


Рисунок 1 – Явление двухкратного отражения

На текущий момент существует возможность аппаратного устранения двухкратного отражения путем использования особых оптических схем: тонкопленочные просветляющие покрытия, светоделительный куб.

Так, в работе [2] предложено использование в качестве светоделительного элемента клина с небольшим углом, таким, чтобы падающее излучение, отражающееся от второй грани, претерпевало полное внутреннее отражение и оставалось внутри клина. Однако такое решение работает только в случае квазипараллельного пучка. Известны решения [3] на основе тонких пленок на основе нитроцеллюлозной мембраны. Но описанное решение не может использоваться в оптической аппаратуре, подверженной вибрации в виду чувствительности пленки к акустическим колебаниям. В литературе описано использование светоделительного куба, однако он имеет проблему множественных отражений. Любой из



описанных аппаратных методов решения проблема двухкратного отражения создает ограничения на геометрию оптической системы. Что же касается программных методов, то хорошие результаты показывает алгоритм, предложенный в [4]. Описанный метод универсальный и не требует предварительных лабораторных измерений. Однако время обработки одного изображения размером  $400 \times 600$  пк. занимает 22 мин. при использовании 22 ядер процессора. Если предположить, что сложность алгоритма линейно зависит от числа пикселей, то для изображения ВСС ( $11600 \times 8700$  пк.) время коррекции оставит 120 ч. А зависимость может быть не только линейной, но и более высокого порядка. Поэтому был предложен собственный метод коррекции «призраков» на изображении.

Можно сформулировать модель возникновения «призраков» на изображении ВСС следующим образом: на неискаженное изображение накладывается смещенное по вертикали то же изображение с определенным процентом непрозрачности. То есть на значения пикселя с координатами  $(x, y)$  влияют значения пикселя с координатами  $(x, y+d)$ . Однако пиксель с координатами  $(x, y+d)$  также является результатом наложения «призрака» на неискаженное изображение – на этот пиксель оказывает свое влияние пиксель  $(x, y+2d)$ . На который, в свою очередь, влияет пиксель с координатами  $(x, y+3d)$ , и так далее. Предложенный рекурсивный метод устранения «призраков» описывается формулой 1:

$$\begin{cases} I_0(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{g1}(x, y) \cdot p}{1 - p}, \\ I_{g1}(x, y) = \frac{I(x, y+d) - I_{g2}(x, y) \cdot p}{1 - p}, \\ \dots \\ I_{gn-1}(x, y) = \frac{I(x, y+(n-1) \cdot d) - I_{gn}(x, y) \cdot p}{1 - p}, \\ I_{gn}(x, y) = I(x, y+n \cdot d), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты изображения (начало координат в левом верхнем угле);  $I(x, y)$  – значение пикселя изображения с «призраком» в соответствующих RGB каналах;  $I_0(x, y)$  – значение пикселя неискаженного изображения (без «призрака»);  $I_g(x, y)$  – значение пикселя паразитного изображения («призрака»).  $p$  – доля непрозрачности (от 0 до 1) паразитного изображения при наложении на неискаженное;  $d$  – величина смещения по вертикали изображения-«призрака» относительно неискаженного;  $n$  – количество итераций по учету влияния на пиксель его прообраза. Предложенный алгоритм работает за линейное время, или за время  $O(n)$ , что является хорошей алгоритмической характеристикой [5].

Для уточнения пространственной модели формирования «призраков» был выполнен лабораторный эксперимент, в ходе которого регистрировались изображения лазерного пучка и его «призраков» с помощью ВСС (рисунок 2). Увеличенный фрагмент в зеленой рамке демонстрирует пучок лазера (внизу) и его «призрак» (сверху).

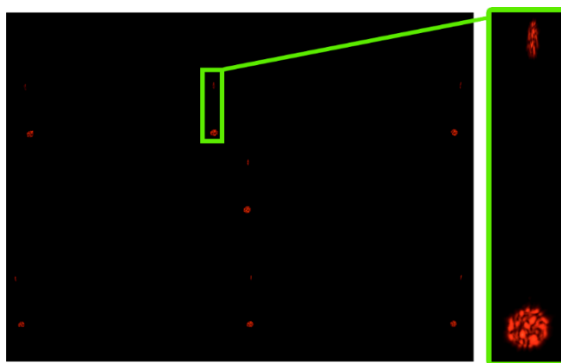


Рисунок 2 – Зарегистрированные лазерные пучки и их «призраки».

Анализируя результаты эксперимента, были определены зависимости смещений формы и положения координат «призраков» от координат пикселей оригинального изображения по обеим осям, что позволило уточнить первичную модель формирования и устранения «призраков» на изображениях ВСС. Определена доля непрозрачности «призрака»  $p=0,09$ .

Разработано программное обеспечение, реализующее разработанный метод коррекции «призраков» на языке MATLAB. С его помощью было исследовано влияние максимального числа итераций  $n$  по устранению «призраков». При  $n=2$  достигается оптимальный баланс между точностью устранения «призраков» и временем на проведение вычислений (Теряется всего лишь 0,07% интенсивности третьего прообраза пикселя). На рисунке 3 представлена половина изображения тестовой миры, полученного ВСС, и половина изображения с выполненной коррекцией (при  $n=2$ ). Для оценки результатов была выбрана прямоугольная область II, покрывающая «призрак от темной линии. Выше и ниже этой области выбраны аналогичные по размеру прямоугольные области I и III, на которых отсутствуют «призраки» от темных линий. Для этих областей рассчитаны средние значения интенсивности пикселей. До коррекции «призрак» темной линии (II) темнее окружающего фона (I и III) на 4,46%, а после коррекции область с устраненным «призраком» (II) ярче окружающего фона (I и III) всего на 0,2%. Полученный результат свидетельствует о возможности программного устранения «призраков» на изображении и хороших первоначальных результатах.

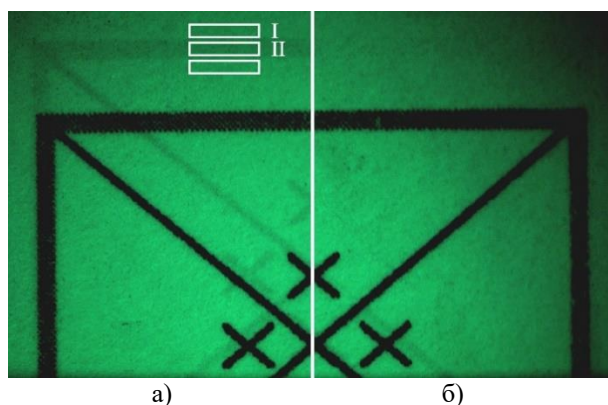


Рисунок 3 – Результат устранения «призраков» на фотоснимке ВСС тестовой миры  
а) – область без коррекции; б) – область с коррекцией

#### Список литературы

1. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту Российского сегмента МКС / Б.И. Беляев, М.Ю. Беляев, Э.Э. Сармин, В.Ф. Гусев, Л.В. Десинов, В.А. Иванов, Ю.А. Крот, А.О. Мартинов, В.В. Рязанцев, В.А. Сосенко // Космическая техника и технологии. – 2016. – № 2 (13). – С. 70–79.
2. Liepmann, T. W. Wedged plate beam splitter without ghost reflections / T.W. Liepmann // Appl. Opt. – 1992. – Vol. 31. – P. 5905–5906.
3. Пленочные светоделители [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edmundoptics.eu/f/pellicle-beamsplitters/12443/>. – Дата доступа: 13.04.2023.
4. YiChang Shih, Reflection removal using ghosting cues / YiChang Shih, D. Krishnan, F. Durand, W. T. Freeman // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Boston, MA, USA, 2015. – P. 3193–3201.
5. Prasanna Kumar, K. N. A general theory of the system ‘quantum information – quantum entanglement, subatomic particle decay – asymmetric spin states, non locally hidden variables – a concatenated model / K. N. Prasanna Kumar, B. S. Kiranagi, C. S. Bagewadi. // International Journal of Scientific and Research Publications. – July 2012. – T. 2, Issue 7. – ISSN 2250–3153.

## **ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПОДЛОЖКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АКТИВНОГО СЛОЯ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА В СОСТАВЕ ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Работа посвящена определению параметров наноструктуры в составе фотоакустического излучателя, обеспечивающих высокий коэффициент поглощения и ширину спектральной полосы поглощения по уровню 0.9 от максимальной интенсивности в оптическом спектре поглощения. Для изучения зависимости оптических параметров активного слоя в составе фотоакустического излучателя от свойств подложки и окружающей среды исследовались спектры типичных наноструктур в виде монослоя наночастиц Ag на подложках с различными показателями преломления.

В современных системах технической и биомедицинской диагностики существует стойкая необходимость в компактных, размером до нескольких сотен микрон, широкополосных источниках ультразвука, которые позволяют с высокой точностью выявлять пространственное положение, структуру дефекта или нарушения конструкции исследуемого объекта [1, 2]. Ранее продемонстрировано, что фотоакустические излучатели на основе наноструктур, размещенных на поверхности твердого тела, облучаемые модулированным оптическим излучением, позволяют формировать ультразвуковые сигналы с частотой до десятков мегагерц [3, 4]. Такой фотоакустический излучатель в обязательном порядке содержит активный слой: монослой наночастиц (НЧ), нанесенный на поверхность твердого тела. Для обеспечения широкополосного преобразования модулированного по интенсивности оптического излучения в акустический сигнал необходимо выполнение целого ряда требований, одним из которых является обеспечение высокого коэффициента поглощения активным слоем в широком диапазоне длин волн [4, 5]. В общем случае характеристики полосы поглощения, определяемой эффектом поверхностного плазмонного резонанса (ППР) нв НЧ, например, ее спектральное положение и форма, сильно зависят от материала и морфологии наночастиц, которые являются составной частью фотоакустического излучателя, при этом, диэлектрическая система с НЧ, также играют немаловажную роль [6].

Целью является определение параметров наноструктуры в составе фотоакустического излучателя, обеспечивающих высокий коэффициент поглощения и ширину спектральной полосы поглощения по уровню 0.9 от максимальной интенсивности в оптическом спектре поглощения. Для изучения зависимости оптических параметров активного слоя в составе фотоакустического излучателя от свойств подложки и окружающей среды исследовались спектры типичных наноструктур в виде монослоя НЧ Ag с радиусом  $r = 25$  нм и плотностью заполнения поверхности  $\rho = 50\%$  на подложках с различными показателями преломления в диапазоне  $1 \div 3$  в окружающей среде с показателями преломления в диапазоне  $1 \div 2$  в конфигурации, когда излучение падает на наноструктуру со стороны НЧ и подложки.

С помощью метода конечных элементов проводился теоретический расчет спектров поглощения наноструктур в составе фотоакустического излучателя для различных значений показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды, что необходимо для обеспечения стабильной работы фотоакустического излучателя в различных технических и биологических средах. Параметры спектральной полосы поглощения для различных значений показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды образуют двумерные поверхности, далее которые представлены и анализированы в виде линий уровня.

На рисунке 1 приведена длина волны спектрального максимума поглощения для наноструктуры на основе сферических НЧ серебра с радиусом 25 нм при плотности заполнения ими подложки 50%, рассчитанная в зависимости от показателей преломления подложки и

окружающей НЧ среды. Независимо от направления падения излучения, наблюдается следующее: 1. максимум пика ППР сдвигается в длинноволновую область с увеличением показателя преломления подложки с коэффициентами  $1,7 \div 7$  нм на единицу изменения показателя преломления подложки в зависимости от величины показателя преломления среды; 2. для диапазона длин волн  $350 \div 500$  нм максимум пика ППР сдвигается в длинноволновую область с увеличением показателя преломления среды с коэффициентом  $\sim 75$  нм на единицу изменения показателя преломления. Таким образом, увеличение показателя преломления окружающей среды в большей степени влияет на длинноволновый сдвиг максимума пика ППР, чем увеличение показателя преломления подложки. Это связано с особенностями формирующегося распределения поля в окружающей среде и подложке.

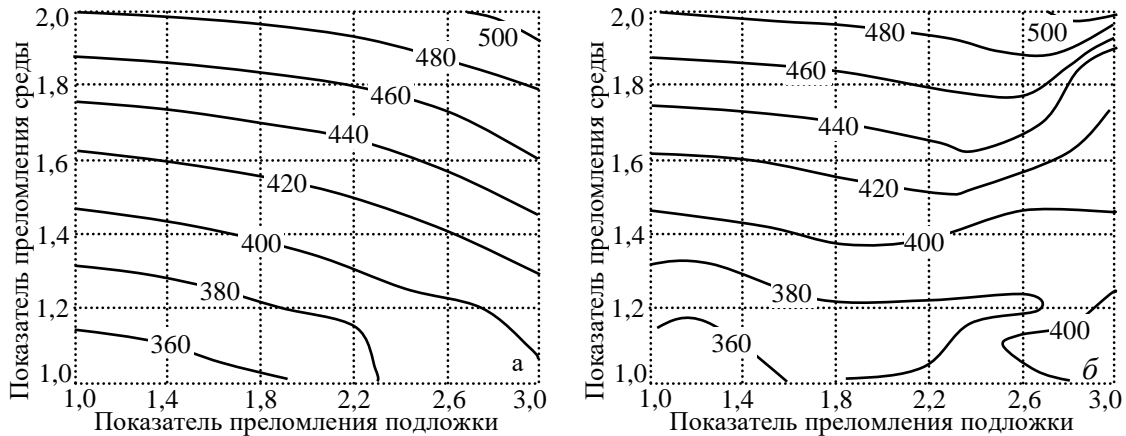


Рисунок 1 – Длина волны спектрального максимума поглощения для наноструктуры на основе сферических НЧ серебра радиусом 25 нм при плотности заполнения ими подложки 50%, рассчитанная в зависимости от показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды: излучение падает со стороны НЧ (а) и со стороны подложки (б)

На рисунке 2 приведена зависимость ширины пика ППР по уровню 0,9 в спектре коэффициента поглощения от показателей преломления подложки и окружающей среды. Можно выделить следующие особенности данной зависимости, где показатели преломления окружающей среды  $n_{surround}$  и подложки  $n_{surf}$ . 1.  $1 \leq n_{surround} \leq 1,6$  и  $1 \leq n_{surf} \leq 2,1$  (излучение падает со стороны НЧ) и  $1 \leq n_{surround} \leq 1,7$  и  $1 \leq n_{surf} \leq 1,8$  (излучение падает со стороны подложки) ширина пика ППР по уровню 0,9 в спектре поглощения изменяется незначительно в диапазонах 25–35 нм и 30–40 нм соответственно; 2.  $1,6 < n_{surround} \leq 2$  (излучение падает со стороны НЧ),  $1,7 < n_{surround} \leq 2$  (излучение падает со стороны подложки) и  $1 \leq n_{surf} < 2,4$  имеет место монотонное сужение пика ППР от 45 нм и 30 нм соответственно до 20 нм при увеличении  $n_{surf}$ ; 3.  $1,6 < n_{surround} \leq 2$  (излучение падает со стороны НЧ),  $1,7 < n_{surround} \leq 2$  (излучение падает со стороны подложки) и  $2,4 \leq n_{surf} \leq 3$  характерно немонотонное изменение ширины пика ППР по уровню 0,9 в диапазоне значений от 20 нм до  $50 \div 60$  нм, что связано с особенностями коллективных взаимодействий в системе «НЧ-соседние НЧ-подложка-окружающая среда» для структур с большим показателем преломления подложки и окружающей среды.

Независимо от направления падения излучения на наноструктуру, с увеличением показателя преломления подложки при  $n_{surround} = \text{const}$  характерно монотонное увеличение коэффициента поглощения в максимуме пика ППР. Увеличение коэффициента поглощения достигает значения  $\sim 0,05$  на единицу изменения показателя преломления подложки (для случая, когда  $n_{surround} = 2$  и излучение падает со стороны подложки). При увеличении показателя преломления окружающей среды (при  $n_{surf} = \text{const}$ ) имеет место изменение величины максимума коэффициента поглощения в пике ППР на величину  $\sim 0,09$  (излучение падает со стороны НЧ) и  $0,075$  (излучение падает со стороны подложки) на единицу изменения показателя преломления окружающей среды. Из анализа зависимостей следует, что на оптические свойства поглощения наноструктур в монослое металлических НЧ на подложке оказывает большее значение изменение показателя преломления среды, чем подложки.

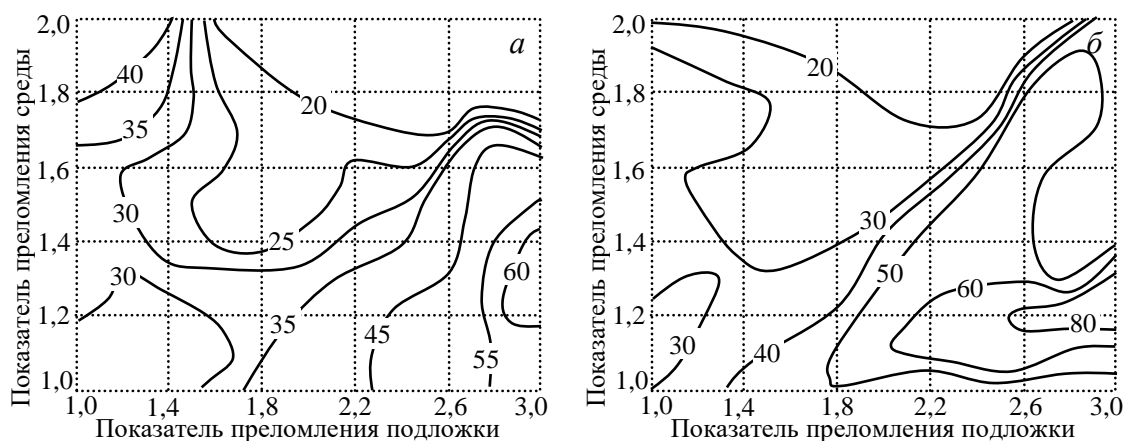


Рисунок 2 – Ширина по уровню 0.9 спектрального максимума поглощения для наноструктуры со сферическими НЧ серебра с радиусом 25 нм при плотности заполнения ими подложки 50%, рассчитанная в зависимости от показателей преломления подложки и окружающей НЧ среды: излучение падает со стороны НЧ (а) и со стороны подложки (б)

В работе продемонстрировано, что показатель преломления окружающей среды оказывает большее влияние на оптические параметры активного слоя фотоакустического излучателя, чем показатель преломления подложки не зависимо от того, с какой стороны падает излучение на наноструктуру. Это проявляется в больших весовых коэффициентах при сдвигах максимумов пиков ППР, изменениях ширины пиков ППР и значений интенсивностей на единицу изменения показателя преломления, при прочих равных условиях, что связано с тем, что на пространственное распределение напряженности электрического поля в системе «НЧ-соседние НЧ-подложка-окружающая среда» большее влияние оказывает окружающая среда, которая имеет большую площадь соприкосновения с НЧ, чем подложка. Следует отметить, что изменение показателя преломления окружающей среды в большей степени влияет на поведение линий уровня (в частности, на положение максимума пика ППР, ширину по уровню 0,9, коэффициент поглощения) в оптических спектрах поглощения, что значительно снижает требования к используемому типу оптического волокна или подслоя на торце последнего, используемого в составе фотоакустического излучателя.

#### Список литературы

1. Mikitchuk, A. P. Current state of the research on optoacoustic fiber-optic ultrasonic transducers based on thermoelastic effect and fiber-optic interferometric receivers / A. P. Mikitchuk, E. I. Girshova, V. V. Nikolaev // *Computer Optics*. – 2023. – in press.
2. Efficient photoacoustic conversion in optical nanomaterials and composites / Taehwa Lee [et al.] // *Advanced Optical Materials*. – 2018. – Vol. 6, № 24. – P. 1800491–1800491.
3. Prospects for using organic and metal– polymer materials in optoacoustic generators of ultrasound / E. I. Girshova [et al.] // *Bulletin of the Russian academy of sciences: Physics*. – Vol. 86, №7. – 2022. – P. 833–836.
4. Hybrid metal polymer as a potential active medium of an optoacoustic generator / E. I. Girshova [et al.] // *Technical Physics Letters*. – 2022. – Vol. 48, № 2. – P. 32–35
5. Mikitchuk, A. P. Thermophysical and mechanical properties of active membranes for photoacoustic generators of forced acoustic oscillations / A. P. Mikitchuk, E. I. Girshova, M. M. Kugeiko // *Technical Physics Letters*. – 2022. – Vol. 48, № 4. – P. 50 – 53.
6. Zou Xiaotian, Wu Nan, Tian Ye, Zhang Yang, Wang Xingwei Polydimethylsiloxane thin film characterization using all-optical photoacoustic mechanism // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52. – P. 6239–6244.

УДК 535.36

Мискевич А. А., Лойко В. А., Лойко Н. А., Базылевич В. А., Нестерович Д. Е.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОНОСЛОЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА СРЕДОЙ, В КОТОРОЙ ОНИ РАСПРЕДЕЛЕНЫ

Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь

Разработан метод описания оптических свойств системы «монослой сферических частиц в поглощающей среде» при падении под произвольным углом плоской волны с произвольной поляризацией, учитывающий многократное рассеяние волн. Исследовано влияние параметров монослоя (размера, показателя преломления, типа пространственной упорядоченности частиц и фактора заполнения монослоя) на поглощение света средой, в которой он расположен. Показано, что, используя частично упорядоченный монослой частиц, можно увеличить коэффициент поглощения среды более чем в 3 раза в требуемом интервале длин волн по сравнению с однородным слоем среды той же толщины. Используя сильно упорядоченный монослой это увеличение может быть больше 20 в узких спектральных интервалах, соответствующих «решёточным резонансам».

Предложенный нами в работах [1-4] метод описания оптических свойств монослоя сферических частиц (светопоглощающих или непоглощающих) в *непоглощающей* среде развит на случай описания рассеивающих и поглощающих свойств системы «монослой сферических частиц в *поглощающей* среде» при падении под произвольным углом плоской волны с произвольной поляризацией (Рис. 1). Он учитывает многократное рассеяние волн, основан на использовании квазикристаллического приближения (ККП), приближения среднего поля и мультипольного разложения полей и функции Грина по векторным сферическим волновым функциям.

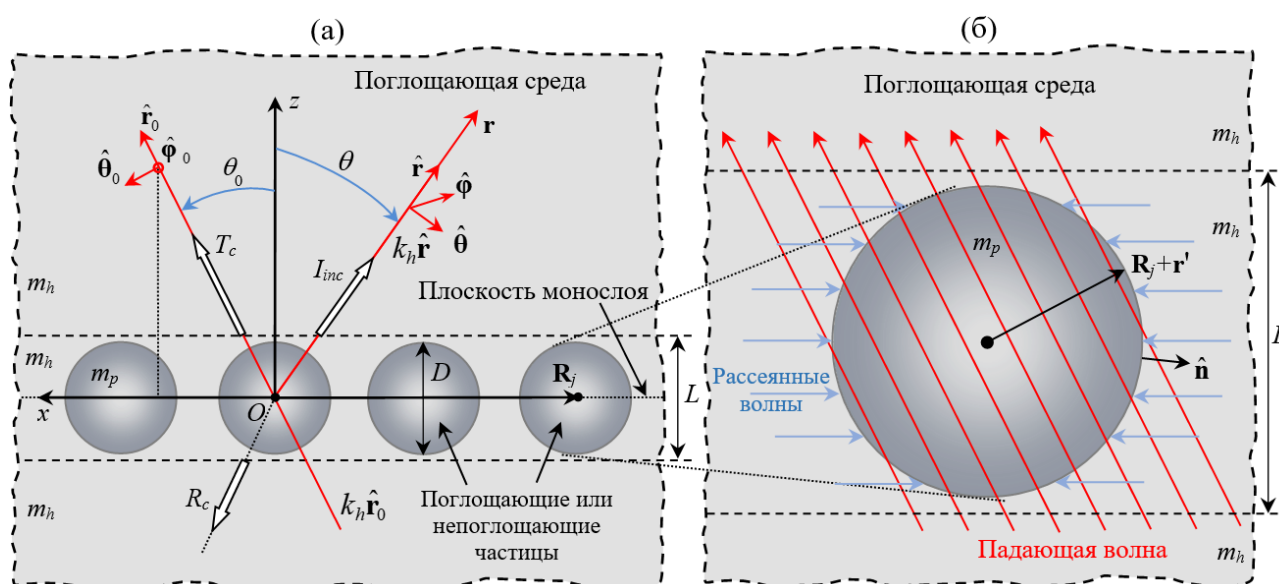


Рисунок 1 – Схематическое изображение: (а) монослоя однородных сферических частиц в однородной поглощающей среде (матрице) и геометрии освещения и регистрации рассеянного излучения (вид вдоль плоскости монослоя), (б) отдельной частицы монослоя, находящейся в «эффективном» поле, образованном падающей волной и волнами, рассеянными всеми частицами монослоя.  $m_h$  и  $m_p$  – комплексные показатели преломления среды и частиц,  $\mathbf{R}_j$  и  $\mathbf{R}_j+\mathbf{r}'$  – радиус-векторы центра и элементарной площадки на поверхности  $j$ -й частицы относительно начала координат  $O$ , находящегося в центре произвольно выбранной частицы,  $\hat{\mathbf{r}}_0, \hat{\theta}_0, \hat{\Phi}_0$  и  $\hat{\mathbf{r}}, \hat{\theta}, \hat{\Phi}$  – единичные векторы, определяемые направлением волнового вектора падающей,  $k_h \hat{\mathbf{r}}_0$ , и рассеянной,  $k_h \hat{\mathbf{r}}$ , волн,  $\theta_0$  и  $\theta$  – полярные углы волнового вектора падающей и рассеянной волн,  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $T_c$  и  $R_c$  – коэффициенты когерентного пропускания и отражения системы, состоящей из монослоя частиц с диаметром  $D$  и слоя матрицы с толщиной  $L$ .  $I_{inc}$  – интенсивность некогерентно рассеянного излучения.

Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии

Получены формулы для описания углового распределения рассеянного излучения  $I_{inc}^{rd}(\hat{\mathbf{r}}) = I_{inc,0}^{rd}(\hat{\mathbf{r}})e^{-2xq\beta_h(1/\mu_0+1/|\mu|)}$ , коэффициентов когерентного пропускания  $T_c = T_{c,0}e^{-4xq\beta_h/\mu_0}$  и отражения  $R_c = R_{c,0}e^{-4xq\beta_h/\mu_0}$ , некогерентного рассеяния  $F_{inc} = \int d\varphi \int I_{inc}^{rd}(\hat{\mathbf{r}}) \sin\theta d\theta$ , поглощения  $A=1-T_c-R_c-F_{inc}$  слоя среды толщины  $L$  (Рис. 1), содержащего монослой, где

$$I_{inc,0}^{rd}(\mathbf{r}) = \frac{16\pi\eta S_2 SE_0^2}{x^2(1+\beta_h^2)r^2} \left\{ \left[ \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[ i\varepsilon_\varphi \sin(m\varphi) a_{ml}(\mu) + \varepsilon_\theta \cos(m\varphi) b_{ml}^+(\mu) \right] \right]^2 + \left[ \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[ i\varepsilon_\theta \sin(m\varphi) c_{ml}(\mu) + \varepsilon_\varphi \cos(m\varphi) d_{ml}^+(\mu) \right] \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

$$T_{c,0} = \left| \varepsilon_\theta \left\{ 1 - \frac{8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[ m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(o)} + \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(e)} \right] \right\}^2 + \varepsilon_\varphi \left\{ 1 - \frac{8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \alpha_{ml} \left[ m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(o)} + \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(e)} \right] \right\}^2 \right|, \quad (2)$$

$$R_{c,0} = \left| \frac{\varepsilon_\theta 8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l (-1)^{l-m} \alpha_{ml} \left[ m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(o)} - \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(e)} \right] \right|^2 + \left| \frac{\varepsilon_\varphi 8\pi\eta}{x^2(1+i\beta_h)^2\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l (-1)^{l-m} \alpha_{ml} \left[ m\pi_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlE}^{(o)} - \tau_l^{(m)}(\mu_0) d_{mlM}^{(e)} \right] \right|^2, \quad (3)$$

а также коэффициента поглощения частиц  $A_p$  монослоя

$$A_p = -\frac{2\eta n_h e^{-2x\beta_h q / \cos\theta_0}}{x^2 \cos\theta_0} \operatorname{Re} \left[ \frac{i}{m_p} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{l(l+1)(l+m)!}{(2l+1)(l-m)!} \left\{ \left[ \left| a_{mlM}^{(e)} \right|^2 (1+\delta_{0m}) + \left| a_{mlM}^{(o)} \right|^2 (1-\delta_{0m}) \right] \tilde{\psi}_l \tilde{\psi}_l'^* - \left[ \left| a_{mlE}^{(e)} \right|^2 (1+\delta_{0m}) + \left| a_{mlE}^{(o)} \right|^2 (1-\delta_{0m}) \right] \tilde{\psi}_l'^* \tilde{\psi}_l \right\} \right] \quad (4)$$

и среды  $A_h = A - A_p$ , в которой они расположены. В (1)-(4)  $q=L/D$ ,  $\mu=\cos\theta$ ,  $\mu_0=\cos\theta_0$ ,  $\beta_h=\kappa h/n_h$ ,  $\eta$  – фактор заполнения монослоя,  $x=\pi D n_h/\lambda$  – параметр дифракции частицы,  $\lambda$  и  $\varepsilon_\theta$ ,  $\varepsilon_\varphi$  – длина и компоненты вектора поляризации падающей волны,  $r=|\mathbf{r}|$ ,  $S_2$  и  $S$  – структурный фактор и площадь монослоя, “видимая” приёмником,  $\pi_l^{(m)}$ ,  $\tau_l^{(m)}$  – угловые функции,  $\psi_l$ ,  $\tilde{\psi}_l$  – функции Риккати-Бесселя, коэффициенты  $a_{ml}(\mu)$ ,  $c_{ml}(\mu)$ ,  $b_{ml}^+(\mu)$ ,  $d_{ml}^+(\mu)$  и  $a_{mlM(E)}^{(e,o)}$  находятся через коэффициенты  $d_{mlM(E)}^{(e,o)}$  [5], входящие в (2), (3).

При разработке и оптимизации устройств на основе слоёв частиц часто требуется увеличить поглощение света средой (матрицей) либо в широком диапазоне длин волн, например, в солнечных элементах, либо в относительно узком спектральном интервале, например, в химических фотореакторах, где важно максимизировать использование падающего света в полосе поглощения фотосенсибилизатора. На основе полученных выражений нами проведён анализ коэффициента поглощения  $A_h$  слабопоглощающей среды с комплексным показателем преломления  $m_h=1.343+0.001i$  при разных параметрах монослоя с целью увеличения поглощения света средой в области полосы поглощения ( $\lambda \approx 0.660$  мкм) фотосенсибилизатора Methylene Blue (MB), используемого в фотокаталитических реакциях.

На Рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента поглощения среды  $A_h$ , содержащей монослой частиц, а также коэффициента поглощения  $A_h^{et}$  однородного слоя среды той же толщины и отношения  $A_h/A_h^{et}$  для разных материалов частиц. Показаны зависимости для параметров монослоя, при которых в полосе поглощения MB имеют место максимумы  $A_h$  и  $A_h/A_h^{et}$ . Из Рисунков 2а,б видно, что при достаточно большом контрасте  $m_p$  и  $m_h$  эти максимумы реализуются в достаточно узком диапазоне диаметров частиц ( $0.25 \text{ мкм} \leq D \leq 0.36 \text{ мкм}$ ) и факторов заполнения монослоя ( $0.3 \leq \eta \leq 0.5$ ) и имеют достаточно близкие значения. Из Рис. 2б видно, что отношение  $A_h/A_h^{et}$  в области максимума близко для большинства рассмотренных систем, кроме случаев  $m_p=m_{Al}$  и  $m_p=m_{Al_2O_3}$ , что может быть обусловлено большим значением  $\kappa_{Al}$  и малым  $n_{Al_2O_3}$ , соответственно. Анализ результатов расчётов показывает:

(i) использование монослоёв диэлектрических непоглощающих частиц с малым показателем преломления ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) практически не даёт увеличения ( $m_p=m_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ ) либо уменьшает ( $m_p=m_{\text{SiO}_2}$ )  $A_h$  и  $A_h / A_h^{et}$ , (ii) использование сильно упорядоченных монослоёв (Рис. 2в,г) позволяет получить большие значения  $A_h$  и  $A_h / A_h^{et}$  в узких интервалах длин волн, соответствующих «решётчным резонансам», которые значительно превышают соответствующие значения для частично упорядоченных систем,  $A_h^{po}$ ,  $A_h^{po} / A_h^{et}$ , показанных пунктирными линиями.

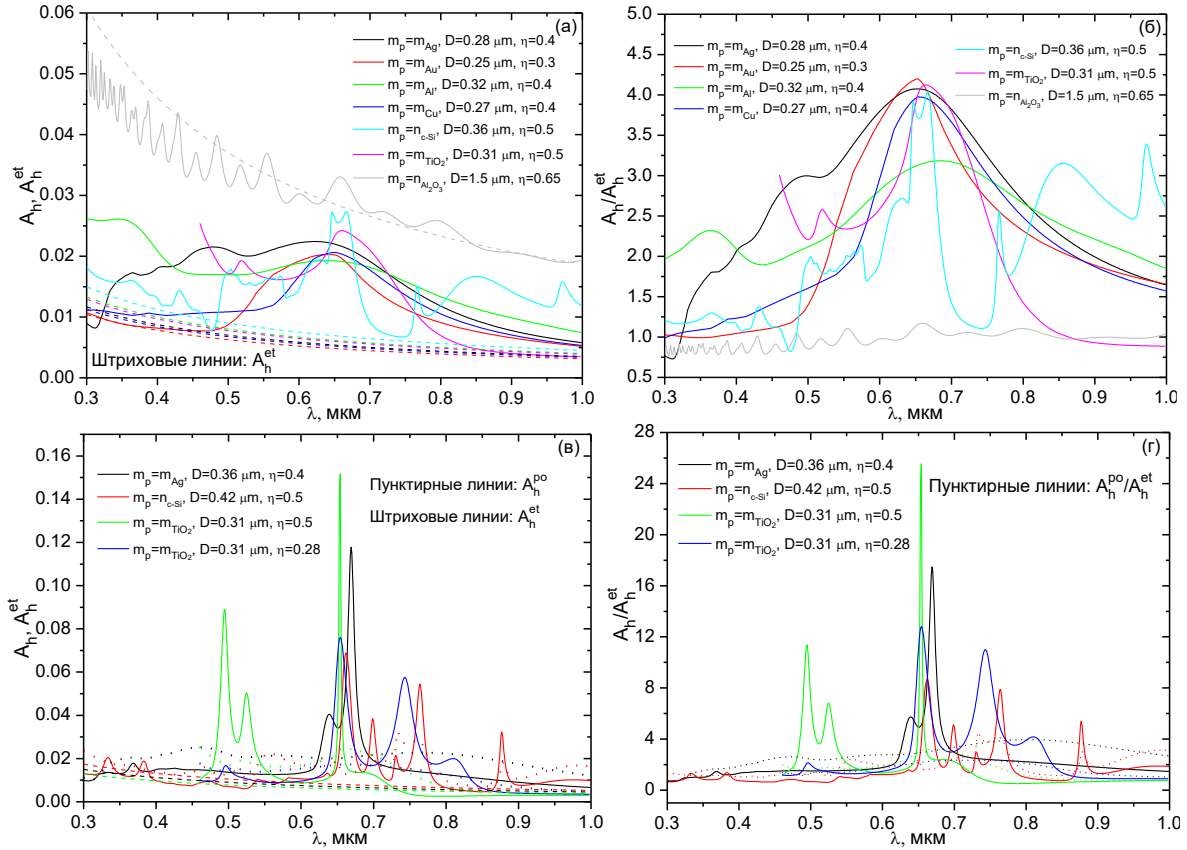


Рисунок 2 – Спектральные зависимости (а, в) коэффициентов  $A_h$ ,  $A_h^{et}$ , (б, г) отношений  $A_h / A_h^{et}$  системы, состоящей из (а, б) частично упорядоченного монослоя и (в, г) упорядоченного монослоя с неидеальной треугольной решёткой из сферических частиц в среде с  $m_h=1.343+0.001i$ .  $m_p=m_{\text{Ag}}$ ,  $m_p=m_{\text{Au}}$ ,  $m_p=m_{\text{Cu}}$ ,  $m_p=m_{\text{Al}}$ ,  $m_p=m_{\text{c-Si}}$ ,  $m_p=n_{\text{TiO}_2}$ ,  $m_p=n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ ,  $\theta_0=0^\circ$ ,  $L=D$ .

Результаты работы могут быть использованы для разработки и оптимизации устройств на основе монослоёв частиц: химических фотореакторов, солнечных элементов, светодиодов и т.д.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Ф23КИ-020).

#### Список литературы

1. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Incoherent component of light scattered by a monolayer of spherical particles: analysis of angular distribution and absorption of light, *JOSA A* 35, 108–118 (2018).
2. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Scattering and Absorption of Light by a Monolayer of Spherical Particles under Oblique Illumination, *JETP* 131, 227-243 (2020).
3. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Polarization of light scattered by a two-dimensional array of dielectric spherical particles, *JOSA B* 38(9), C22-C32 (2021).
4. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, “Absorption of diffuse light by 2D arrays of spherical particles,” *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.* 289, 108291-1-9 (2022).
5. N. A. Loiko, A. A. Miskevich, V. A. Loiko, Optical characteristics of a monolayer of identical spherical particles in an absorbing host medium, *JOSA A* 40, 682-691 (2023).



## СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si/Al С ОКОШЕЧНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Методами Фурье-спектроскопии были исследованы экспериментальные спектры пропускания периодических структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si и Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si/Al с окошечным поверхностным слоем, легированным имплантацией ионов As<sup>+</sup>. Обнаружено, что после проведения термического отжига уровень пропускания структуры Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si падает на 5–20%, при этом поведение кривых пропускания не изменяется. Установлено, что осаждение на обратную сторону структуры пленки алюминия не влияет на уровень пропускания структуры без отжига, но значительно (более, чем на 20%) уменьшает уровень пропускания отожженной структуры, что может быть связано с возникновением в поверхностном слое плазмонных колебаний.

### Введение

Масштабируемое и недорогое производство поглотителей излучение в среднем и длинноволновом инфракрасном диапазонах имеет важное значение для изготовления разнообразных устройств от тепловизоров до инфракрасных датчиков [1]. В последние годы был предложен ряд материалов и структур, поглощающих излучение в инфракрасной области, часть из них – метаматериалы, структурированный поверхностный слой которых может поддерживать плазмонные колебания [2]. При этом в качестве альтернативных плазмонных материалов в области ближнего и среднего инфракрасного диапазона могут использоваться высоколегированные полупроводники. Благодаря возможности изменять плазменную частоту полупроводников, изменяя их уровень легирования, можно настраивать частоту плазмонного резонанса в нужном диапазоне длин волн [2].

В настоящей работе методом инфракрасной Фурье-спектроскопии были исследованы спектры пропускания структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si и Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si/Al до и после термического отжига.

### Материалы и методы

Модель исследуемой структуры представлена на рисунке 1.

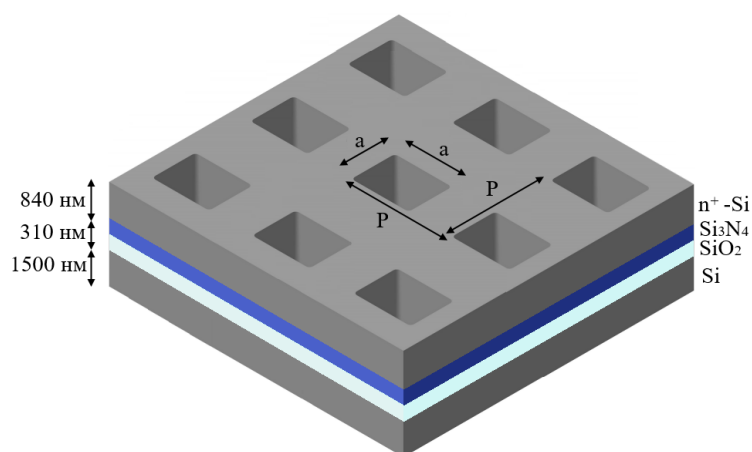


Рисунок 1 – Модель исследуемой структуры

Исходные подложки представляли собой пластины монокристаллического кремния марки КДБ-10. После стандартной операции химической очистки в смеси Каро и перекисно-аммиачного раствора на подложку последовательно осаждали слои SiO<sub>2</sub> и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 160 нм и 150 нм соответственно, а также слой поликристаллического кремния толщиной 840 нм. Легирование поверхностного слоя поликристаллического кремния проводилось с помощью имплантации ионов мышьяка с энергией 60 кэВ до дозы  $3.1 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Для формирования периодической структуры применялась технология фотолитографии с последующим

плазмохимическим травлением. В поверхностном слое кремния были вытравлены до слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  квадратные окна размером  $a = 4$  мкм, расположенные с периодом  $P = 8$  мкм. После чего подложка образцов была стравлена в смеси азотной и плавиковой кислот до толщины около 1500 нм. На обратную сторону части образцов осаждалась пленка Al толщиной 90 нм.

Спектры пропускания образцов исследуемых структур  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  и  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{Al}$  измерялись в диапазоне 2–25 мкм с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Spectrum 3 Optica (Perkin Elmer). Спектры пропускания снимались с диафрагмой 2 мм, накоплением 1 мин и разрешением  $2 \text{ см}^{-1}$ .

### Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены спектры пропускания структур  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  и  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}/\text{Al}$  до и после проведения термического отжига (пленка Al осаждалась уже после отжига исходной структуры). Поскольку ионная имплантация приводит к аморфизации приповерхностного слоя, поверхностный слой неотожженной структуры представлял собой слой поликристаллического кремния толщиной ~ 690 нм, на котором располагается слой аморфного кремния толщиной ~ 150 нм. В результате отжига аморфный слой рекристаллизовался и поверхностный слой структуры представлял собой слои  $n^+\text{-Si}/\text{poly-Si}$  толщиной ~ 740 нм и ~ 100 нм соответственно (см. схематические изображения структур на рис. 2).

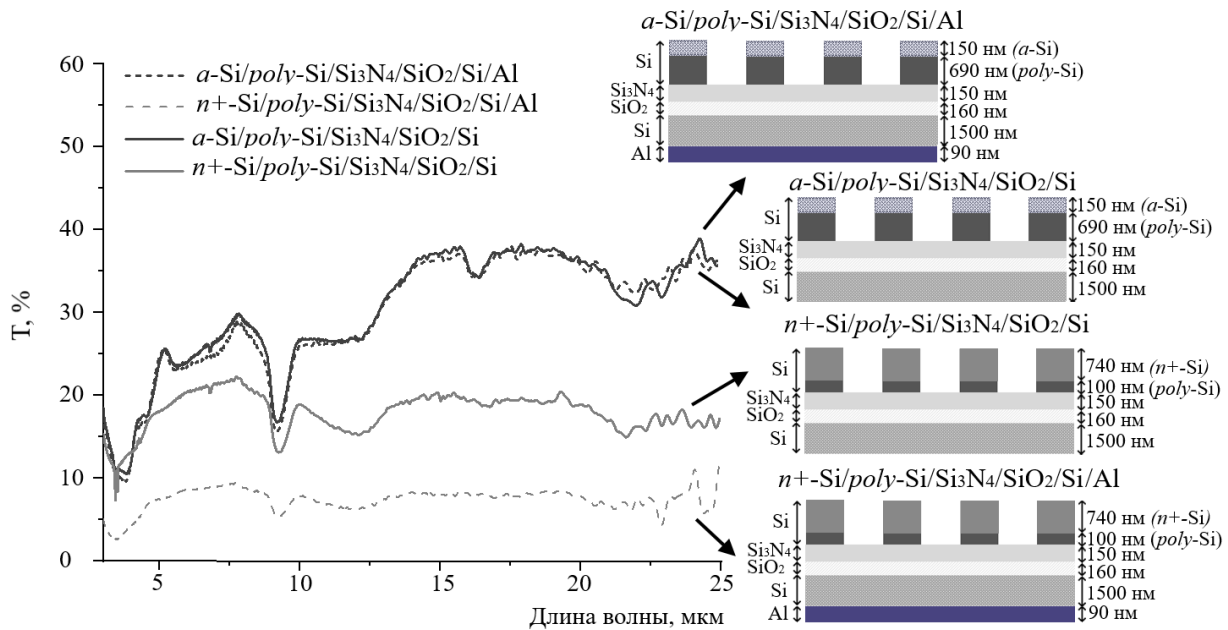


Рисунок 2 – Спектры пропускания исследуемых структур  $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  и  $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$

Можно заметить, что неотожжённые ( $a\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  и  $a\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ ) структуры пропускают в среднем на 10–20 % больше, чем отожженные ( $n^+\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  и  $n^+\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$ ) практически во всем исследованном диапазоне. При этом спектры пропускания структур  $a\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  и  $a\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$  практически не различаются во всем исследованном спектральном диапазоне. Интенсивность пропускания для этих структур возрастает от 10% на 3.5 мкм до 35% на 20 мкм с небольшими провалами на длинах волн 9.5 мкм, 12.5 мкм, 16.5 мкм. Кривая поглощения структуры  $n^+\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$  ведет себя схожим образом, но пропускает меньше, чем структура до проведения термического отжига (в диапазоне от 5 мкм до 10 мкм в среднем на 5 % меньше, а в диапазоне 10–25 мкм это различие увеличивается до 15–20%). Спектр пропускания структуры  $n^+\text{-Si}/\text{poly-Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{Al}$  отличается от спектров, рассмотренных выше. Кривая пропускания практически во всем исследованном диапазоне находится на уровне 7–8% за исключением некоторых провалов на длинах волн 3 мкм, 9.5 мкм, 12.5 мкм.

Часть пиков кривых пропускания и полос поглощения в спектрах пропускания, приведенных на рисунке 2, вероятнее всего объясняется наличием в структуре диэлектрических слоев диоксида кремния и нитрида кремния. Так, например, в диапазоне 9–9,5 мкм проявляется поглощение в слое диоксида кремния, а на длине волны 12,5 мкм наблюдаются колебания мостиковых групп Si-O-Si [3]. Полочка на длине волны 11,5 мкм может быть связана с валентными колебаниями связей Si-N [4]. Уменьшение коэффициента пропускания в структурах после отжига ( $n^+$ -Si/poly-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si) по сравнению со структурой без отжига вероятно можно объяснить появлением в поверхностном слое сильнопроводящего подслоя. Мы предполагаем, что в окошечном поверхностном слое структур  $n^+$ -Si/poly-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si и  $n^+$ -Si/poly-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si/Al могут возникать плазмонные колебания, которые в совокупности с поглощением на свободных носителях уменьшают уровень пропускания [1]. Заметное уменьшение уровня пропускания структуры  $n^+$ -Si/poly-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si после осаждения слоя Al можно связать с отражением волн в том числе и плазмонных от этого слоя, как от зеркала. Поскольку размер окошек поверхностного слоя составляет 4 мкм резкое уменьшение уровня пропускания на длине волны около 3–4 мкм для всех исследованных структур может быть связано с возникновением специфических колебаний в этих окошках [2]. Также на длине волны 8 мкм, равной периоду поверхностного слоя, у отожженных структур наблюдается наибольшая полочка в спектрах пропускания. Эта полочка также может быть связана с возникновением плазмонных колебаний в поверхностном слое [2, 5].

#### Заключение

Таким образом, в работе были исследованы экспериментальные спектры пропускания периодических структур Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si и Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si/Al с окошечным поверхностным слоем до и после проведения термического отжига. Обнаружено, что после проведения термического отжига уровень пропускания структуры падает на 5–20%, при этом поведение кривых пропускания изменяется не сильно. Также установлено, что осаждение на обратную сторону структуры пленки алюминия не влияет на уровень пропускания структуры без отжига и в то же время значительно (более, чем на 20%) уменьшает уровень пропускания отожженной структуры, что может быть связано с возникновением в поверхностном слое плазмонных колебаний. Установлено, что появление на спектрах пропускания отожженных структур полос поглощения на длинах волн 3–4 мкм и 8 мкм также может быть связано с возникновением плазмонных эффектов.

#### Благодарности

Исследования проводились при финансовой поддержке БРФФИ в рамках гранта Т-22-030.

#### Список литературы

1. Chen, C. Large-area long-wave infrared broadband all-dielectric metasurface absorber based on markless laser direct writing lithography / Cheng Chen, Yanhua Liu, Zhouying Jiang, [et.al] // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – Is. 8. – pp. 13391-13403.
2. Abouelatta M. A. A. et al. Concentric tubes silicon-based metamaterial structure for mid-IR broadband absorption / M. A. A. Abouelatta, Muhammad A. Othman, Mai Desouky [et al.] // Optics Express. – 2021. – Vol. 29. – Is. 25. – pp. 41447-41456.
3. Kitamura, R. Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature / R. Kitamura, L. Pilon, M. Jonasz // Applied optics. – 2007. – Vol. 46. – Is. 33. – pp. 8118-8133.
4. Busca, G FT-IR study of the surface properties of silicon nitride / G. Busca, V. Lorenzelli, G. Porcile, M.I. Baraton, P. Quintard, R. Marchand // Materials Chemistry and Physics. – Vol. 14. – Is. 2. – pp. 123-140. – 1986.
5. Zhao, X. Implementing infrared metamaterial perfect absorbers using dispersive dielectric spacers / Xiaoguang Zhao, Chunxu Chen, Aobo Li, [et. al.] // Opt. Express. – Vol. 27.- Is. 2. – pp. 1727-1739. – 2019.

УДК 535.374

Орлович В. А.<sup>1</sup>, Першин С. М.<sup>2</sup>, Водчиц А. И.<sup>1</sup>, Ходасевич И. А.<sup>1</sup>, Гришин М. Я.<sup>2</sup>

## ОСОБЕННОСТИ ПОПУТНОГО И ОБРАТНОГО ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В ВОДЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

<sup>1</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Институт общей физики РАН, Москва, Россия

Экспериментально исследованы энергетические, спектральные и пространственные характеристики попутного и обратного вынужденного комбинационного рассеяния в воде при возбуждении излучением второй гармоники пикосекундного Nd:АИГ лазера.

Вода является важным компонентом биосферы. Молекулярная структура воды определяется строением ее молекул и формированием из них дальнего порядка, приводящего к образованию пространственно организованных структур. Важными методами анализа структуры воды являются спонтанное комбинационное рассеяние (СКР) и, в последнее время, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) [1]. В экспериментах возможно наблюдение вынужденного рассеяния в попутном с распространением накачки направлении (попутное ВКР, ПВКР) и в обратном направлении (ОВКР). В большинстве работ, посвященных исследованию воды, использовалось ПВКР. Необходимо отметить, что зачастую ОВКР имеет ряд преимуществ по сравнению с ПВКР. В частности, при использовании ОВКР можно достигнуть больших эффективностей ВКР–преобразования, получить значительное сокращение длительности импульсов, наблюдать эффект обращения волнового фронта. Следует также отметить, что полоса СКР колебания  $A_1$ ,  $\nu=3450 \text{ см}^{-1}$  (валентное полносимметричное колебание), имеет аномально большую ширину, что позволяет надеяться использовать воду в качестве активной среды лазеров сверхкоротких импульсов. В последнее время актуальными стали исследования влияния границ раздела фаз (например, жидкость–плазма, жидкость–газ) на нелинейно-оптические эффекты, в том числе и на ВКР. В настоящей работе мы исследовали процессы ПВКР и ОВКР в воде вблизи границы раздела вода–воздух.

В экспериментах использовалось излучение второй гармоники пикосекундного ( $\approx 60 \text{ пс}$ ) Nd:АИГ лазера. Диаметр пучка накачки составлял  $\approx 8 \text{ мм}$ , а его расходимость не превышала  $0,6 \text{ мрад}$ . Пучок накачки фокусировался через или на открытую поверхность воды, находящейся в вертикально установленной кювете длиной  $75 \text{ мм}$ , линзой с фокусным расстоянием  $83 \text{ мм}$ . В области фокальной перетяжки, которая в приближении гауссова пучка имела диаметр  $\approx 40 \text{ мкм}$  и длину  $\approx 2 \text{ мм}$ , интенсивность лазерного излучения могла превышать несколько  $\text{ТВт/см}^2$ . Однако вплоть до значений  $\approx 5 \text{ ТВт/см}^2$  оптический пробой в воде не наблюдался. Кювета, заполненная дистиллированной водой, могла перемещаться микроподвижкой с точностью  $10 \text{ мкм}$  относительно фокусирующей линзы. В экспериментах измерялись энергетические, спектральные и пространственные характеристики всех потоков излучения.

На рисунке 1а приведены зависимости порога ПВКР и ОВКР от расстояния  $L$  фокальной плоскости каустики пучка до поверхности воды. Отрицательные значения  $L$  соответствуют нахождению плоскости каустики пучка внутри слоя воды и отсчитываются от ее поверхности.

Отметим, что для ПВКР эта зависимость имеет N-образный вид с минимальным значением порога возбуждения при совпадении положения фокальной плоскости с поверхностью воды. Ранее мы получали подобную зависимость при использовании для возбуждения ВКР в воде и тяжелой воде лазерных импульсов с длительностями  $\approx 15 \text{ пс}$  [2]. Причиной возникновения такой N-образной зависимости является влияние на порог ПВКР несимметричного резонатора, в качестве одного из зеркал которого выступает распределенная обратная связь (РОС), возникающая вследствие рассеяния излучения на оптических неоднородностях воды

[3, 4], а второго – поверхность воды с коэффициентом френелевского отражения  $\approx 2\%$ , который существенно выше, чем коэффициент световозвращения при РОС.

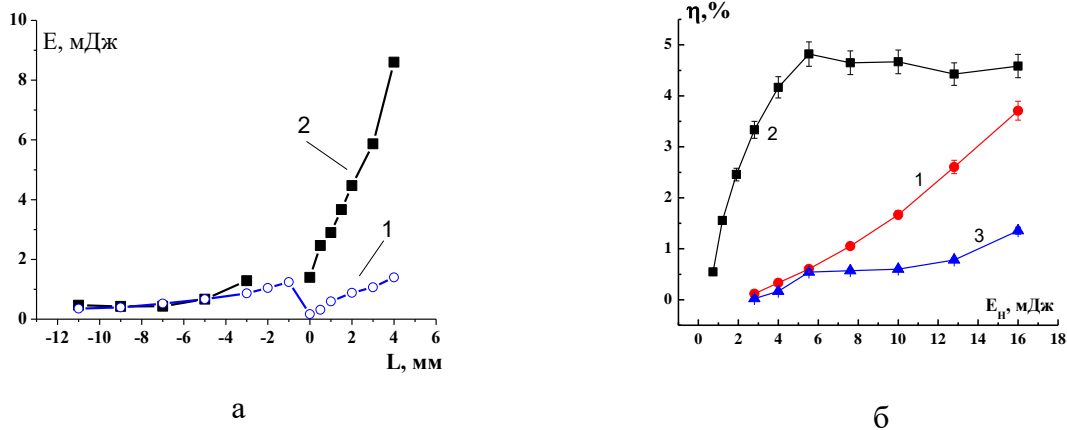


Рисунок 1 – Зависимости порога ПВКР (1) и ОVKР (2) от расстояния фокальной плоскости каустики пучка до поверхности воды (а) и эффективности ПВКР (1) и ОVKР (2) от энергии импульсов накачки (б), кривая 3 – эффективность ПВКР на границе раздела вода-воздух

Для ОVKР порог возбуждения при  $L$ , изменяющемся от  $-5$  до  $-11$  мм примерно соответствует порогу ПВКР, что объясняется динамикой взаимодействия обратно рассеянного излучения с набегающей неистощенной накачкой. В области  $L$  от  $-3$  до  $-1$  мм происходит срыв генерации ОVKР, при этом наблюдается разбрызгивание воды, что обусловлено доставкой энергии лазерного импульса высокой интенсивности в малый объем воды, ограниченный сверху ее поверхностью. Нарушение оптической однородности воды искажает пространственный профиль пучка накачки и блокирует развитие ОVKР вследствие малой толщины слоя воды ( $\approx 2,5$  мм), в котором развивается ОVKР. Затем, когда фокальная плоскость каустики пучка накачки и область максимальной ее интенсивности перемещаются на поверхность воды, прекращаются процессы возмущения воды и ОVKР появляется вновь. Как и для ПВКР, поддерживает развитие ОVKР в этом диапазоне  $L$  описанный выше несимметричный резонатор. На рисунке 1б приведены зависимости энергетической эффективности  $\eta$  ВКР-преобразования лазерного излучения в стоксово от энергии импульсов накачки  $E_H$ . Кривые 1 и 2 относятся к ОVKР и ПВКР при значении  $L = -12$  мм. Максимальное значение  $\eta \approx 5\%$  для ОVKР достигается при  $E_H \approx 5$  мДж. Отметим, что на рисунке 1б приведены технические значения эффективности ВКР-преобразования. Физические значения  $\eta$  (с учетом потерь на оптических элементах) выше в  $\approx 2,5$  раза.

Измерены поперечное распределение и спектры ПВКР вблизи порога возбуждения ПВКР в условиях, когда перетяжка лазерного пучка была расположена на поверхности воды. Возбуждалось излучение первой стоксовой и первой антистоксовой компонент. Структура обоих пучков состояла из осевой и кольцевой частей и включала в себя излучение с частотными сдвигами  $\approx 3000$  см $^{-1}$  и  $\approx 3430$  см $^{-1}$ . На рисунке 2 в качестве примера приведены нормированные спектры осевой и кольцевой частей пучка первой стоксовой компоненты. Видно, что излучение с частотным сдвигом  $3430$  см $^{-1}$  сконцентрировано преимущественно в осевой части пучка, а со сдвигом  $3000$  см $^{-1}$  в кольцевой. Аналогичная картина наблюдается и для антистоксовой компоненты с той только разницей, что генерация осевой части пучка была неустойчивой. Оценки, исходя из диаметров кольцевых структур излучения ПВКР, показали, что причиной их возникновения являются четырехфотонные параметрические процессы типа  $\vec{k}_H + \vec{k}_H = \vec{k}_S + \vec{k}_{as}$ , где  $\vec{k}_i$  – волновые вектора излучений накачки, стоксовой и антистоксовой компоненты. Следует отметить, что в спектрах спонтанного КР полосы со сдвигом  $\approx 3000$  см $^{-1}$  обусловлены ОН валентными колебаниями кластеров, содержащих 7-10 молекул H $_2$ O [5]. Как следует из [6], концентрация таких кластеров является наибольшей в слое 100 –

200 мкм вблизи поверхности воды. В наших экспериментах были реализованы условия, которые позволили впервые обнаружить проявление таких колебаний в спектрах ВКР.

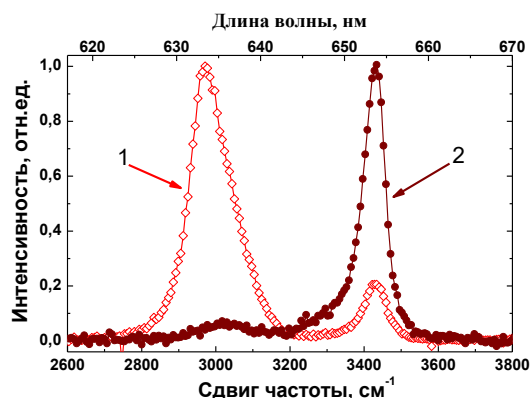


Рисунок 2 – Спектр стоксова излучения ПВКР в области 2800 – 3600 см<sup>-1</sup>. 1 – спектр кольцевой структуры, 2 – спектр осевого пучка.

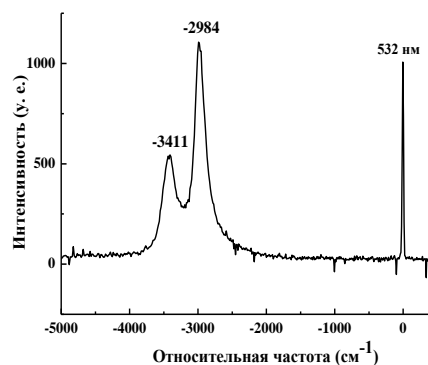


Рисунок 3 – Спектр антистоксовой компоненты ОВКР.

В спектре ОВКР также обнаружена генерация первой антистоксовой компоненты (рисунок 3). Наибольшей интенсивности она достигает при фокусировке возбуждающего излучения на поверхность раздела вода-воздух, имеет в спектре две полосы со сдвигами  $\approx 3411$  и  $2984$  см<sup>-1</sup> и генерируется в виде осевого пучка. Возможными причинами ее возникновения могут быть четырехфотонные параметрические процессы типа описанных выше, с учетом наличия в воде распространяющихся в обратном направлении потоков лазерного излучения, образующихся вследствие обратного рассеяния на оптических неоднородностях жидкости и бобстонах (пузырьки газа нанометрового размера), а также ОВКР на длине волны стоксова излучения (рисунок 2).

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф23-РНФ-040) и РФФ (грант №23-42-10019).

#### Список литературы

1. Pershin S.M., Grishin M.Ya., Lednev V.N., Chizhov P.A., Orlovich V.A. Asymmetrical-cavity picosecond Raman laser at the water–air interface // *Opt. Lett.* -2019 - Vol.44, No.20. -P. 5045-5048.
2. Pershin S.M., Vodchits A.I., Khodasevich I.A., Grishin M.Ya., Lednev V.N., Orlovich V.A., Chizhov P.A. Picosecond stimulated Raman scattering at 3000 and 3430 cm<sup>-1</sup> OH vibrations without optical breakdown // *Opt. Lett.* – 2020. - Vol.45, No.20. – P.5624-5627.
3. Ахманов С.А., Ляхов Т.А. Эффекты неоднородности оптической накачки в ВКР лазерах и в вынужденном рассеянии. Самовозбуждение за счет распределенной обратной связи // *ЖЭТФ* – 1974. - Т.66, №1. – С. 96 -108.
4. Апанасевич П.А., Афанасьев А.А., Грабчиков А.С., Корольков М.В., Орлович В.А. Зависимость пороговых и спектральных характеристик ВКР-лазера от периода пространственно-неоднородной накачки // *ЖПС* – 1982. – Т.36, №3. – С. 396-402.
5. Buck U., Husken F. Infrared Spectroscopy of Size-Selected Water and Methanol Clusters // *Chem Rev.* – 2000. - Vol.100, No.11. – P.3863 – 3890.
6. Pollack G.H. The Fourth Phase of Water: Beyond Solid, Liquids and Vapor. - Ebner and Sons Publisher, 2013. - 357 p.

**AB INITIO STUDY ON SPECTROSCOPIC AND RADIATIVE PROPERTIES OF THE LOW-LYING STATES OF THE RaAt MOLECULE**Faculty of Physics, Belarusian State University, Minsk, Belarus<sup>1</sup>,  
University of Salerno, Fisciano, Italy<sup>2</sup>

В рамках релятивистского метода связанных кластеров в пространстве Фока рассчитаны функции потенциальной энергии основного и нижних возбуждённых электронных состояний молекулы RaAt. Получены молекулярные спектроскопические параметры термов, энергии вибронных состояний, дипольные моменты переходов, факторы Франка – Кондона и другие радиационные характеристики. Предложена схема прямого лазерного охлаждения молекул RaAt.

During the last decades, the unique properties of ultracold diatomic molecules are considered to be used for manifold potential applications including controlling dipole–dipole interactions between two or more molecules, quantum information processing, control of collisions and chemical reactions, and some others. New promising applications of ultracold molecules also include research for parity-violation effects, namely, the possibility of observation of an electron’s electric dipole moment (eEDM) [1]. In the latter case measured parameters critically depend on the atomic mass, and thus, for these goals it is preferable to use heavy atoms, which often do not have stable isotopes. The mentioned applications require ultralow temperatures of molecular gases, which can be reached using laser cooling methods, including direct laser cooling [1]. The principles of direct laser cooling of molecules are based on scattering (absorption and re-emission) of a large number of photons by a molecule. Among numerous promising candidates for the successful realization of the cooling scheme, the alkaline earth monohalides look most attractive due to their unique electronic structure of the ground and lower excited states, which is determined by excitation of the valence  $ns$  electron of the metal atom to the  $np$  or  $(n - 1)d$  state in the ionic  $M^+X^-$  structure (where  $M = \text{Be, Mg, Ca, Sr, Ba, or Ra}$ ;  $X = \text{F, Cl, Br, I, or At}$ ) [2]. As a result, excitation of valence electron almost does not influence the form of the low-lying potential energy curves (PECs). Among alkaline earth monohalides family the radium compounds are of the highest interest from the point of view of the possible determination of eEDM due to the largest mass of the radium atom compared to other alkaline earth metal atoms. However, due to the high degree of radioactivity of radium and the absence of its stable isotopes, the radium monohalides are the least experimentally studied. Recently, we used the FC-RCC (Fock-space relativistic coupled cluster) level of theory to obtain spectroscopic properties of the ground and five low-lying excited states of the RaF [3], RaBr [4], and RaI [5] radicals. Our calculations for the RaF molecule [3] demonstrate an excellent agreement with the experimental data [6]. The main spectroscopic parameters of the ground and low-lying ionic excited terms as well as the parameters of parity-violation effects of the RaCl molecule were also recently calculated [7]. There are no cooling parameters for RaAt at all. To fill in this blank here we use the same level of theory to calculate PECs and other spectroscopic and radiative characteristics of the RaAt radical and clarify the advantages of the various radium monohalides compounds from the point of view of their effective direct laser cooling.

We used the Stuttgart ECPDS78MDFSO and ECPDS60MDFSO fully relativistic effective core potentials and Gaussian cc-pwCVTZ-PP basis sets. *Ab initio* relativistic calculations were performed using Kramers unrestricted FS-RCCSD method. Firstly, pseudospinors were generated at the HF-SCF level of theory for the closed-shell ground state of RaAt<sup>+</sup> ion. Then, the FS-RCCSD calculations in the (0,1) Fock sector (0 holes, 1 electron) were performed for the RaAt<sup>+</sup> ion for six low-lying states. All calculations were performed using the DIRAC quantum chemical package [8].

The calculated PECs are shown in Fig. 1. Systems of the lowest ionic terms of all radium monohalides are similar in the minima region. The equilibrium internuclear distances in the series RaF → RaCl → RaBr → RaI → RaAt monotonously increase (2.269–2.287 Å for RaF [3], 2.813–

2.828 Å for RaCl [7], 2.986–3.001 Å for RaBr [4], 3.214–3.230 Å for RaI [5], and 3.307–3.325 Å for RaAt); the energies of all excited terms monotonously decrease. The sequence of the lowest PECs is the same ( $X^2\Sigma^+$ ,  $A^2\Pi_{1/2}$ ,  $B^2\Delta_{3/2}$ ,  $B^2\Delta_{5/2}$ ,  $A^2\Pi_{3/2}$ , and  $C^2\Sigma^+$ ) for all radium monohalides, excluding the RaF radical, for which according to our calculations [39] the  $A^2\Pi_{3/2}$  term lies lower than the  $B^2\Delta_{5/2}$  one.

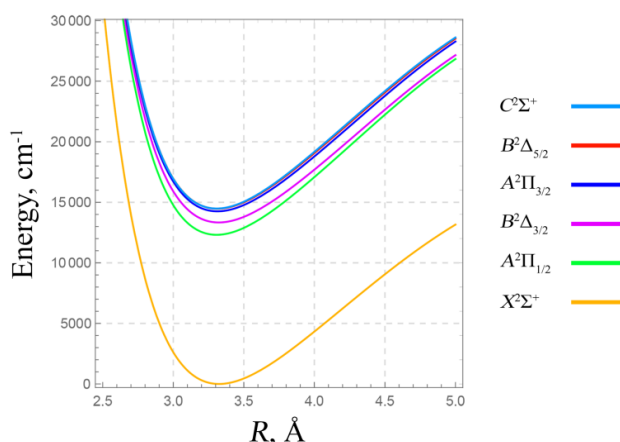


Figure 1 – The calculated PECs for low-lying states of the RaAt molecule.

Radium and astatine have no stable isotopes; the longest-lived isotopes of radium and astatine are  $^{226}\text{Ra}$  with a half-life of about 1600 years and  $^{210}\text{At}$  with a half-life of about 8 hours. We calculated the vibrational energies for the  $^{226}\text{Ra}^{210}\text{At}$  radical for six low-lying PECs and then obtained the harmonic vibrational frequencies  $\omega_e$  and other molecular spectroscopic parameters for these electronic states. Based on the calculated PECs and vibrational energies, we predicted Franck–Condon factors (FCFs) and vibrational branching ratios (VBRs), which, in contrast to FCFs, can be directly measured in a spectroscopic experiment. The FCFs and VBRs were calculated for the  $A^2\Pi_{1/2} \rightarrow X^2\Sigma^+$ ,  $A^2\Pi_{3/2} \rightarrow X^2\Sigma^+$ , and  $C^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$  allowed vibronic transitions. Since the  $A^2\Pi_{1/2}$  state is a lower excited one, the  $A^2\Pi_{1/2} \leftrightarrow X^2\Sigma^+$  channel satisfies at least two Di Rosa’s criteria [9] and is considered as the most advantageous for direct laser cooling. The FCFs distribution for the transitions between the lowest vibrational states of the  $A^2\Pi_{1/2}$  and  $X^2\Sigma^+$  terms are shown in Fig. 2.

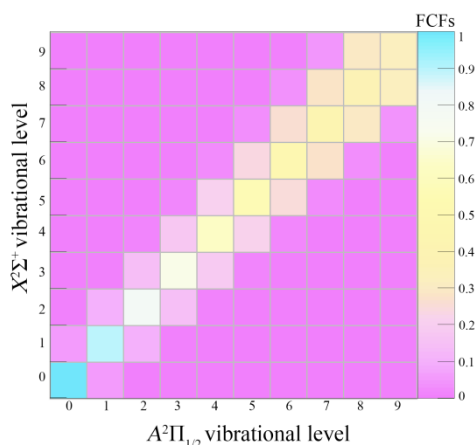


Figure 2 – The calculated FCFs for the  $A^2\Pi_{1/2}(v'=0\dots9) \rightarrow X^2\Sigma^+(v''=0\dots9)$  vibronic transitions of the RaAt molecule.

Diagonal FCFs for the  $A^2\Pi_{1/2} \rightarrow X^2\Sigma^+$  transitions demonstrate the trend to decreasing in a series of the RaF, RaCl, RaBr, RaI, and RaAt molecules. E.g., the  $0' \rightarrow 0''$  FCF is equal to 0.999998 (RaF, [3]), 0.998516 (RaCl [7]), 0.990752 (RaBr [4]), 0.954439 (RaI [5]), and 0.949196 (RaAt). Generally, the FCFs distribution for the radium monohalides exhibits more and more diffuse character as shown in Fig. 2.

The generalized vibrational cooling scheme, including three-color lasers is shown in Fig. 3. The main laser with the wavelength  $\lambda_{00} = 811.9$  nm drives the  $A^2\Pi_{1/2}(v'=0) \leftarrow X^2\Sigma^+(v''=0)$  transi-



tion. This pumping channel can provide only 20 scatterings. Therefore, the first additional repump laser with the wavelength  $\lambda_{10} = 818.8$  nm (RaAt) returns the population directly from the  $X^2\Sigma^+(v'' = 1)$  state to the  $A^2\Pi_{1/2}(v' = 0)$  state. The second additional repump laser with the wavelength  $\lambda_{21} = 818.6$  nm (RaAt) returns the population indirectly to the main cycle by driving the  $A^2\Pi_{1/2}(v' = 1) \leftarrow X^2\Sigma^+(v'' = 2)$  transition. For the RaAt radicals the number of scattered photons per molecule increases up to 30 000, which is three times more than the lower limit. So, the cooling scheme for the RaAt molecule is assumed to use one pump and two repump lasers.

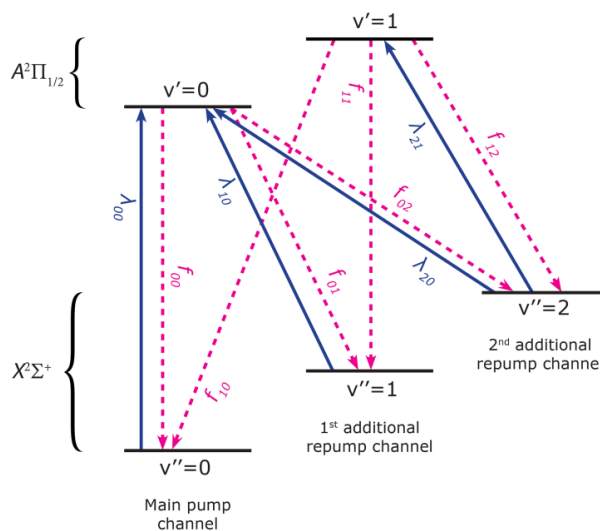


Figure 3 – Vibrational laser cooling scheme for the radium monohalides molecules using the  $A^2\Pi_{1/2}(v') \leftarrow X^2\Sigma^+(v'')$  pump transitions (solid lines) and spontaneous decay (dashed lines).

This work has been supported by the Belarusian State Scientific Research Program "Convergence-2025".

#### Reference

1. Fitch, N.J. Laser-cooled molecules / N.J. Fitch, M.R. Tarbutt// *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics.* – 2021. Vol. 70. – P. 157–262.
2. Törring, T. Energies and electric dipole moments of the low lying electronic states of the alkaline earth monohalides from an electrostatic polarization model / T. Törring, W.E. Ernst, J. Kändler // *J.Chem. Phys.* – 1989. Vol. 90. – P. 4927–4932.
3. Osika, Y. Fock-space relativistic coupled cluster study on the RaF molecule promising for the laser cooling / Y. Osika, M. Shundalau // *Spectrochim. Acta A.* – 2022. – Vol. 264. – P. 120274.
4. Osika, Y. Fock-space relativistic coupled cluster study on the spectroscopic properties of the low-lying states of the radium monobromide RaBr molecule / Y. Osika, M. Shundalau // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* – 2021. – Vol. 276. – P. 107947.
5. Osika, Y. *Ab initio* study on the spectroscopic and radiative properties of the low-lying states of the radium monoiodide RaI molecule / Y. Osika, M. Shundalau, Y.-C. Han // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* – 2022. – Vol. 285. – P. 108144.
6. Garcia Ruiz, R.F. Spectroscopy of short-lived radioactive molecules / R.F. Garcia Ruiz et al. // *Nature.* – 2020. Vol. 581. – P. 396–400.
7. Isaev, T.A. *Ab initio* study and assignment of electronic states in molecular RaCl / T.A. Isaev et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* – 2021. – Vol. 269. – P. 107649.
8. Saue, T. The DIRAC code for relativistic molecular calculations / T. Saue et al. // *J. Chem. Phys.* – 2020. Vol. 152. – P. 204104.
9. Di Rosa, M.D. Laser-cooling molecules. Concept, candidates, and supporting hyperfine-resolved measurements of rotational lines in the A–X(0,0) band of CaH / M.D. Di Rosa // *Eur. Phys. J. D.* – 2004. – Vol. 31. – P. 395–402.

## ОБРАЗОВАНИЕ ФИКСИРОВАННОГО ЗАРЯДА В $\text{SiO}_2$ , ПОЛУЧЕННЫМ ПИРОГЕННЫМ ОКИСЛЕНИЕМ КРЕМНИЯ

Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования влияния твердофазной рекристаллизацией механически нарушенного слоя кремния с применением быстрой термообработки на формирование фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  при пирогенном окислении кремния. Показано, что это приводит к уменьшению поверхностного потенциала по площади пластин и позволяет уменьшить остаточный фиксированный заряд в двуокиси кремния в полтора раза. Снижение поверхностного потенциала по площади пластин указывает на улучшения свойств границы раздела кремний-двуокись кремния, а снижение фиксированного заряда говорит о повышении однородности микро-структуры поверхностного слоя двуокиси кремния, образующегося за счет механически нарушенного слоя на рабочей стороне пластины.

Важную роль в надежности создаваемой электронной элементной базы играют зарядовые свойства границы раздела  $\text{Si-SiO}_2$ , которые в наибольшей степени касаются изделий, изготовленных с применением МОП и КМОП технологий. Это обусловлено тем, что зарядовые свойства определяют, как время наработки на отказ подзатворного диэлектрика, так и зависимость характеристик приборов от условий их эксплуатации [1, 2].

Хорошо известно, что при термическом окислении кремния в  $\text{SiO}_2$  формируется положительный фиксированный заряд, а также заряд быстрых поверхностных состояний. Величины данных зарядов изменяются при повышенных температурах и напряжениях, приводя к изменению характеристик электронной элементной базы, тем самым понижая ее надежность [3, 4]. В настоящее время имеется большое количество качественных моделей, объясняющих появление фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$ , например, наличие примесей металлов [4], заряженных атомов кремния или  $\text{Si-O}$  комплексов [5] и ряд других. Повышение качества современной технологии практически полностью устранило вышеуказанные причины возникновения фиксированного заряда, однако его формирование продолжает иметь место. Это указывает на несоответствие данных моделей причинам образования данного заряда. Наиболее адекватная аналитическая модель его образования и ее математическое описание были предложены в [5]. В данной работе основная причина его формирования связывалась с возникновением неравновесной концентрацией междоузельных атомов кремния и их диффузией как вглубь окисла, так и к границе  $\text{Si-SiO}_2$  с последующей рекомбинацией на ней. Однако, несмотря на хорошее соответствие данной модели экспериментальным результатам, она не смогла описать существование остаточного фиксированного заряда в окисле после его отжига. В этой связи выяснение причины образования остаточного заряда и предложение модели его образования является достаточно актуальным вопросом, так как позволит определить пути его устранения.

В качестве образцов для исследования использовались пластины кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации  $\langle 100 \rangle$  диаметром 100 мм после химико-механической полировки. Часть пластин проходила быструю термообработку в естественных атмосферных условиях путем облучения с рабочей стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры  $1000^\circ\text{C}$ . Затем методом пирогенного окисления при температуре  $850^\circ\text{C}$  в течение 40 мин. формировался подзатворный диэлектрик толщиной 42,5 нм и методом вольт-фарадных характеристик определялось напряжение плоских зон и плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния. Для изучения их распределения по поверхности пластины и определения относительных изменений данных параметров после различных видов обработки, использовался метод сканирующей зондовой электрометрии, основанный на определении контактной разности потенциалов (КРП) [6].

Предложенная в работе [5] модель формирования фиксированного заряда строилась на предположении, что на поверхности кремниевой пластины отсутствует механически нарушенный слой кремния и за образование данного заряда в  $\text{SiO}_2$  отвечают междоузельные атомы кремния (МА). Величина заряда определяется количеством однократно ионизованных междоузельных атомов кремния вблизи межфазной границы, которые оказываются там за счет их генерации на данной границе и диффузии вглубь окисла. Согласно представленному механизму образования фиксированного заряда, уменьшение его величины и плотности быстрых поверхностных состояний с ростом температуры процесса окисления связано с увеличением коэффициента диффузии междоузельных атомов кремния и их последующей рекомбинации на межфазной границе, которые преобладают над скоростью генерации на ней междоузельных атомов кремния.

Однако, как было показано в работе [7] на поверхности кремниевой пластины после финишной полировки остается слой толщиной от 5 до 100 нм, представляющий собой механически деформированную кристаллическую решетку. Это означает, что энергия связи Si-Si в такой кристаллической решетке будет меньше, чем в решетке без ее деформации. Поскольку за формирование фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  отвечают междоузельные атомы (МА) кремния и их концентрация на межфазной границе, следовательно, чем выше скорость их генерации, тем больше фиксированный заряд в  $\text{SiO}_2$ . Учитывая, что наличие деформированного слоя на поверхности пластины приводит к увеличению скорости генерации МА, за счет пониженной энергии связи Si-Si, то это будет приводить к увеличению величины данного заряда. Это означает, что на пластинах, имеющих механически нарушенный слой, величина фиксированного заряда должна быть выше, чем на пластинах с недеформированной кристаллической решеткой на окисляемой поверхности.

С другой стороны, величина фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  также зависит от микроискажений структуры двуокиси кремния, получаемой путем термического окисления кремния. Поскольку рост окисла на 44% идет за счет подложки кремния, у которой на поверхности находится слой с деформированной кристаллической решеткой, то для его полного участия в процессе окисления, толщина выросшего окисла, должна составлять более от 0,01 до 0,22 мкм, при толщине деформированного слоя от 5 до 100 нм. Это означает, что микроструктура верхней части диэлектрика, сформированной за счет деформированной кристаллической решетки кремния, будет иметь нарушенную микроструктуру, в которой имеют место напряженные связи Si-O, оборванные связи Si не заполненные кислородом, уменьшенная сила связей Si-O, измененные углы связей Si-O. Следовательно, весь окисел можно рассматривать как двухслойную систему с различной микроструктурой по толщине. Поскольку, такие микроискажения структуры  $\text{SiO}_2$ , также приводят к возникновению фиксированного заряда, то природа фиксированного заряда в этой части диэлектрика будет определяться как структурой диэлектрика, так и механизмом МА кремния. В этой связи, наблюдаемый в работе [5] остаточный фиксированный заряд в  $\text{SiO}_2$  после отжига, может быть обусловлен микроискаженной структурой верхней части диэлектрика, которая сохраняется и после отжига.

Для подтверждения предполагаемого механизма образования фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  при термическом окислении кремния были подготовлены образцы с окислом толщиной 42,5 нм на кремниевых пластинах КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации  $\langle 100 \rangle$ . Перед окислением половина всех пластин подвергалась БТО при температуре 1000 °С в течение 7 с, путем их фотонного облучения с рабочей стороны пластины. Такая обработка позволяла провести твердофазную рекристаллизацию механически нарушенного слоя [8], тем самым позволяло определить его роль в формировании фиксированного заряда. С этой целью методом вольт-фарадных характеристик определялись плотность заряда и напряжение плоских зон, а сканирующей зондовой электрометрией изучалась КРП. После данных измерений проводилась БТО всех пластин при температуре 1000 °С в течение 7 с, для отжига фиксированного заряда, и осуществлялись повторные измерения всех выше указанных параметров.

Исследование вольт-фарадных характеристик пленок  $\text{SiO}_2$  на пластинах, прошедших быструю термообработку, показывает значительное улучшение их параметров. Наблюдается

уменьшение, как напряжения плоских зон, так и плотности заряда на границе раздела кремний-диоксида кремния.

Анализ пространственного распределения (КРП) по площади пластины с использованием метода сканирующего зонда Кельвина показал, что его величина на пластинах, прошедших такую обработку меньше, чем на пластинах, не проходивших ее. Так для пластин КЭФ 4,5 КРП уменьшился с -1,211 В до -1,134 В, а для КДБ 12 с -0,725 В до -0,359 В. Данные изменения поверхностного потенциала по площади пластины соответствуют уменьшению работы выхода электронов с поверхности и позволяют говорить об улучшении свойств границы раздела кремний-диоксида кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры поверхностного слоя диоксида кремния.

Проведение БТО структур Si-SiO<sub>2</sub>, полученных на кремниевых пластинах с предварительной БТО рабочей поверхности и без такой обработки показало, что во всех случаях имеет место отжиг фиксированного заряда. Так в случае КЭФ 4,5 напряжения плоских зон уменьшилось более чем на порядок, а для КДБ 12 в 1,5 раза, а плотность заряда уменьшилась до 3,7 раза до 4,3 раза соответственно. При этом проведение БТО кремниевых пластин перед окислением позволяет уменьшить остаточный фиксированный заряд в полтора раза. Анализ распределения поверхностного потенциала показал, что проведение БТО пластин после окисления обеспечивает равномерное ее распределение по площади пластины, независимо от БТО исходных подложек.

Подтверждением роли механически нарушенного слоя в формировании остаточного фиксированного заряда в SiO<sub>2</sub> является то, что на пластинах с предварительной обработкой заряд в пленке как после окисления, так и после БТО ниже, чем на пластинах без предварительной быстрой термообработки.

#### Список литературы

1. Солодуха, В. А. Основы силовой электроники / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, А. И. Белоус, С. А. Ефименко – М.: Техносфера, 2019.– 424 с.
2. Харченко, В. А. Проблемы надежности электронных компонент / В. А. Харченко // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, №1. – С. 52-57.
3. Deal, B. E. Standardized Terminology for Oxide Charges Associated with Thermally Oxidized Silicon / B. E. Deal // IEEE Trans. Electron Devices. – 1980. – V. ED-27. – P. 606-610.
4. Красников, Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: В 2 ч. / Г. Я. Красников – М.: Техносфера, 2002. – Ч. 1. – 416 с.
5. Александров, О. В. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния / О. В. Александров, А. И. Дусь // ФТП – 2011. – Т. 45, вып. 4. – С. 474-480.
6. Воробей, Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей, А.Л. Жарин, О.К. Гусев, А.Н. Петлицкий, В.А. Пилипенко, А.С. Турцевич, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67-72.
7. Наливайко, О. Ю. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии: В 3 т. / О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко [и др.]; под. ред. А.С. Турцевича – Минск: Интегралполиграф, 2013. – Т. 1. – 704 с.
8. Пилипенко, В. А. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352.

УДК 535.37+541.14

Самцов М. П.<sup>1</sup>, Тарасов Д. С.<sup>1</sup>, Луговский А. П.<sup>1</sup>, Белько Н. В.<sup>1</sup>, Воропай Е. С.<sup>1</sup>,  
Петров П. Т.<sup>2</sup>, Зильберман Р. Д.<sup>2</sup>, Савин А. О.<sup>2</sup>

## ТРИКАРБОЦИАНИНОВЫЕ КРАСИТЕЛИ ДЛЯ ФОТОТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ

<sup>1</sup> Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

<sup>2</sup> Институт биоорганической химии НАН Беларуси

Результаты исследований эффективности ФДТ с использованием разрабатываемого фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя и перспективности данной разработки

Развитие метода фотодинамической терапии (ФДТ) и внедрение его в различные сферы медицинской практики: онкологию, офтальмологию, гинекологию, урологию, стоматологию и др. связано с появлением в последнее время высокоэффективных фотосенсибилизаторов (ФС) и мощных компактных источников светового излучения. ФДТ является малоинвазивным и органосохраняющим методом лечения. Ранее разработанный ФС «Фотолон» в настоящее время широко используется в РНПЦ «Онкология» для лечения цервикальной интраэпителиальной неоплазии шейки матки. Излечено более 2 тысяч больных, при этом регрессия составляет 94%. ФДТ сочетает в одной процедуре возможность диагностики и терапии, сохранения анатомической целостности шейки матки и репродуктивной функции.

Расширение сферы применения ФДТ в онкологии требует высоко активных ФС, с большей глубиной проникновения активирующего его светового излучения в опухолевые ткани, с более высоким индексом накопления фотосенсибилизатора в клетках - мишенях по сравнению с существующими.

В значительной степени этим требованиям отвечает разработанный в НИИПФП фотосенсибилизатор на основе трикарбоцианинового красителя с ковалентно связанным низкомолекулярным полиэтиленгликолем [1,2]. Разработана схема синтеза и лабораторный регламент получения данного ФС, прототип лекарственной формы в виде лиофилизированного порошка, содержащего краситель и глюкозу в соотношении 1:30, разработаны методики контроля количественного содержания активного компонента – красителя в лекарственной форме ФС.

В качестве источника излучения в ФДТ на моделях перевивных опухолей использовали полупроводниковый лазер с длиной волны света 750 нм с максимальной световой мощностью 1,6 Вт, а также светодиоды с длиной волны 775-783 нм с максимальной световой мощностью 1 Вт.

Методом лазерной контактной спектроскопии проведено исследование распределения и кинетики накопления ФС в органах и тканях, что позволило изучить уровень накопления ФС в опухолевой ткани асцитной карциномы Эрлиха, карциномы легких Льюиса и меланомы clone M-3 в сравнении со здоровой мышечной тканью. В результате установлено, что в течение 1 часа после внутривенного введения достигается максимальная концентрация ФС в опухолевых тканях и сохраняется до 6 часов, при этом индекс контрастности накопления достигает значений 4-7, т.е. содержание ФС в опухолевых тканях по сравнению со здоровой тканью достигает указанных значений. (У разрешенных к использованию в клинической практике ФС этот показатель составляет 2-2,5).

Оценка противоопухолевой эффективности разрабатываемого ФС осуществлялась путем использования экспериментальных моделей перевиваемых опухолей на лабораторных животных. По коэффициенту торможения роста опухоли (ТРО), динамике роста опухоли и излеченности животных. ТРО характеризует степень замедления роста опухоли в испытуемой группе животных по сравнению с контрольной (срок наблюдения 21 сутки), излеченность – это доля животных в группе, для которых достигнуто полное избавление от опухоли.

Установлено, что излучение полупроводникового лазера с длиной волны 750 нм без дополнительных оптических устройств является в значительной степени неоднородным по сечению светового пучка, освещенность различается в 3-4 раза. Путем использования линзового растрового рассеивателя достигнуто существенное снижение разброса интенсивности, обеспечено снижение этого параметра более чем в 5 раз.

Экспозиционная световая доза света ( $\text{Дж}/\text{см}^2$ ) определялась по средней плотности мощности в пределах светового пятна на поверхности облучаемой ткани и длительности облучения. Для установления наилучших условий фотовоздействия проведены исследования реакции лабораторных животных при изменении плотности мощности падающего излучения в диапазоне 50 - 170  $\text{мВт}/\text{см}^2$  и длины волны в области 668-780 нм. В процессе фотовоздействия использованы экраны для устранения возможности попадания лазерного излучения на иные участки тела мышей кроме опухолевых узлов. В эксперименте на беспородных крысах изучена глубина некроза опухолевой ткани перевивных опухолей: саркомы М-1, альвеолярный рак печени РС-1, лимфосаркомы Плисса (ЛФС). При этом достигался полный некроз опухолей, максимальная глубина поражения достигала 27 мм. Средняя глубина некроза опухолей саркомы М-1 у крыс при воздействии света с длиной волны 780 нм в 1,5 раза больше по сравнению с воздействием светом с  $\lambda=740$  нм и в 3 раза больше по сравнению с  $\lambda=668$  нм.

Выявлены оптимальные дозы фотосенсибилизатора и экспозиционные дозы фотооблучения для ФДТ злокачественных опухолей. Показано, что наибольшая противоопухолевая активность фотосенсибилизатора проявляется при введении 10,7 мг/кг красителя для мышей с перевивной опухолью, штамм карцинома легких Льюиса и на модели перевивных опухолей асцитной карциномы Эрлиха, при плотности мощности излучения 100  $\text{мВт}/\text{см}^2$  для лазера с длиной волны 750 нм и 50  $\text{мВт}/\text{см}^2$  – для светодиода с максимумом излучения на 780 нм. В результате установлено, что у мышей-самцов ICR с привитой асцитной карциномой Эрлиха при воздействии излучением в экспозиционной дозе 180  $\text{Дж}/\text{см}^2$  полупроводникового лазера с  $\lambda=750$  нм при плотности мощности 100  $\text{мВт}/\text{см}^2$  или светодиода с  $\lambda=780$  нм при плотности мощности 50  $\text{мВт}/\text{см}^2$  при поддержании одинакового числа поглощенных квантов света в единицу времени в единице объема ткани, коэффициент торможения роста опухоли достигает 100 %.

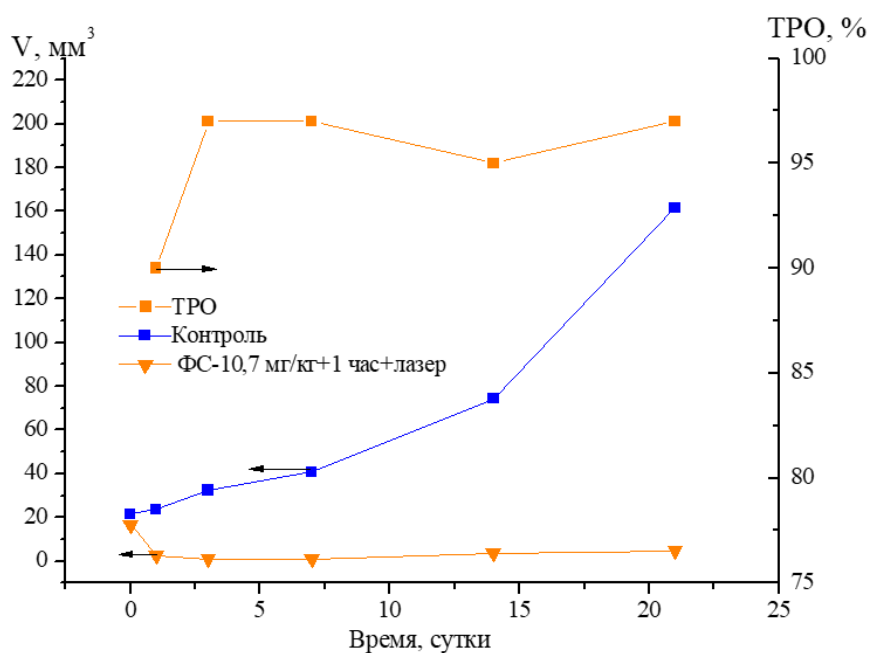


Рисунок 1. Динамика роста опухоли и коэффициента торможения роста опухоли (ТРО) у мышей-самцов линии C57BL/6 с перевивной карциномой легких Льюиса после ФДТ при фотовоздействии излучением лазера  $\lambda = 750$  нм с экспозиционной дозой 160  $\text{Дж}/\text{см}^2$  при плотности мощности 100  $\text{мВт}/\text{см}^2$ , доза фотосенсибилизатора 10,7 мг/кг

Проведено сравнение противоопухолевой активности фотосенсибилизатора на основе индотрикарбацианинового красителя и разрешенного к использованию в медицинской практике препарата Фотолон на половозрелых инбредных мышках-самках линии C57BL/6. В этом эксперименте использовали асцитную карциному Эрлиха, которую перевивали на наружную поверхность бедра животных. Параметры проведения ФДТ для обоих фотосенсибилизаторов были идентичными по следующим параметрам: одинаковая опухолевая модель, способ введения препарата, параметры светового пятна на поверхности опухолевого узла. С целью обеспечения одинаковых условий фотовоздействия на образцы подвод светового излучения от разных лазеров осуществлялся с помощью одного и того же световода и линзового растрового рассеивателя. Установлено, что новый фотосенсибилизатор обладает противоопухолевой фотодинамической эффективностью такую же как Фотолон, а по индексу контрастности и глубине повреждения опухолевых тканей превосходит его.

Проведены исследования острой и субхронической токсичности лекарственной формы фотосенсибилизатора, установлено отсутствие местного и системного токсического действия при 5-ти кратном внутривенном введении в экспериментальной терапевтической дозе крысам-самцам Wistar.

Проведены исследования направленные на выяснение механизма сохранения фотоактивности разработанного ФС в гипоксических условиях. Для установления возможности образования радикалов проведены исследования по фемтосекундной спектроскопии для молекул в форме тесных контактных пар и изучено влияние особенностей структуры молекул индотрикарбацианиновых красителей на их спектрально-люминесцентные и окислительно-восстановительные свойства.

Совокупность полученных результатов свидетельствует о высокой эффективности ФДТ при использовании разработанного фотосенсибилизатора на основе трикарбацианинового красителя и перспективности данной разработки.

#### Список литературы

1. Патент на изобретение: Модифицированный полиэтиленгликолем водорастворимый фотосенсибилизатор для фотодинамической терапии злокачественных опухолей / Самцов М.П., Луговский А.П., Луговский А.А., Петров П.Т., Воропай Е.С., Истомин Ю.П., Каплевский К.Н., Демид Д.И., Тарасов Д.С. // Патент РФ №21252. МПК. С 07D 209/04, С 09В 23/06, А 61Р 35/00; Опубл. 30.08.2017// Афіційны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 4. – С. 93.
2. Alexander Lugovski, Michael Samtsov, Kirill Kaplevsky, Petr Petrov, Eugene Voropay, Dmitri Tarasau, Yuri P. Istomin Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics//Journal of Photochemistry and Photobiology A, 2016.V.316, P.31-36.

УДК 535.37+535.34

Самцов М. П.<sup>1</sup>, Лабода Н. В.<sup>2</sup>, Тарасов Д. С.<sup>1,2</sup>, Белько Н. В.<sup>1</sup>, Луговский А. П.<sup>1</sup>

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕТИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ С ТРЕГАЛОЗОЙ

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования фотофизических свойств ковалентно связанного с трегалозой индотрикарбоцианинового красителя в различных модельных средах.

Появление и распространение устойчивых к антибиотикам болезнетворных бактерий является серьезной проблемой в сфере здравоохранения. Это приводит к трудностям в лечении ранее легко излечимых болезней. *Mycobacterium tuberculosis* является болезнетворной бактерией, вызывающей туберкулез. Согласно данным ВОЗ, это заболевание является одной из десяти ведущих причин смерти в мире и успех в лечении пациентов больных туберкулезом с множественной лекарственной устойчивостью достигается только в 57% случаев. Одним из перспективных методов борьбы с бактериальными инфекциями устойчивыми к антибиотикам является антибактериальная фотодинамическая терапия. Суть её заключается в применении фотосенсибилизаторов способных накапливаться в патогенных бактериях и после облучения конкретной длиной волны деактивировать их путем выработки активных радикалов. Перспективными фотосенсибилизаторами являются полиметиновые красители, максимум поглощения которых приходится на область терапевтического окна биологических тканей, что потенциально позволяет проводить лечение на большей глубине. Имеются статьи, в которых сообщают об использовании трегалозы и её производных, модифицированных флуоресцентными зондами, для мечения и изучения внутренних процессов микобактерий [1-3]. Поэтому возможно использование трегалозы для улучшения накопления и фотодеактивации фотосенсибилизатором микобактерий [4]. В данной работе приведены результаты исследования фотофизических свойств индотрикарбоцианинового красителя, модифицированного по обоим концевым группам трегалозой в различных средах: дистиллированная вода и фосфатно-солевой буфер (ФСБ), этанол, дихлорэтан (ДХЭ) и водный раствор бычьего сывороточного альбумина (БСА).

В спектре поглощения раствора красителя с трегалозой в полярном этаноле максимум основной полосы поглощения, соответствующей переходу из  $S_0$  в  $S_1$  состояния, находится на 726 нм, полуширина полосы составляет 56 нм (рисунок). В коротковолновой области спектра имеется две более слабые полосы с максимумами на 364 и 437 нм. В отличие от исходного красителя спектры поглощения красителя с трегалозой проявляют небольшую зависимость от концентрации. На коротковолновом краю основной полосы поглощения присутствует еще один максимум вблизи 653 нм, интенсивность которого несколько возрастает с ростом концентрации при симбатном уменьшении интенсивности в основной полосе.

Спектр флуоресценции нового красителя в этаноле не зависит от длины волны возбуждения. Максимум располагается на длине волны 752 нм, полуширина составляет 48 нм. Степень поляризации флуоресценции постоянна в пределах полосы испускания и составляет  $30 \pm 2$  %. Кинетика затухания флуоресценции хорошо аппроксимируется одной экспонентой. Время затухания составляет  $1,1 \pm 0,1$  нс. Спектр возбуждения флуоресценции не зависит от длины волны регистрации, но его форма не повторяет спектр поглощения. Максимум спектра возбуждения флуоресценции располагается на 728 нм, при этом в области 653 нм интенсивность намного слабее – нет признаков присутствия полосы дополнительного центра. Это указывает на то, что в этаноловом растворе красителя с трегалозой имеется только один флуоресцирующий центр. По всей видимости второй поглощающий центр обусловлен присутствием ассоциатов красителя.



В водных растворах спектральные свойства нового красителя также в значительной степени определяются агрегацией. В целом спектр поглощения сдвинут в коротковолновую область по сравнению с этанолом. Основная полоса поглощения при концентрации красителя в растворе 2 мкМ сливается с полосой, соответствующей агрегатам, образуя широкую полосу с двумя пиками. Пик мономеров находится на 708 нм, пик агрегатов – на 657 нм, полуширина полосы составляет 117 нм. Коротковолновые пики находятся на 357 и 438 нм. При увеличении концентрации красителя форма спектра меняется, оптическая плотность пика агрегатов возрастает относительно пика мономеров, и его максимум сдвигается в коротковолновую область. В спектрах поглощения красителя без трегалозы в дистиллированной воде проявляется полоса при 513 нм, соответствующая Н\*-агрегатам, основная полоса при этом находится на 705 нм [5]. В определенных условиях он способен к образованию J-агрегатов, которые проявляются в спектре поглощения пиком при 777 нм. У красителя с трегалозой данные полосы не наблюдаются. Можно утверждать, что наличие в структуре красителя на обоих концевых группах трегалозы препятствует образованию сложноструктурированных Н\*- и J-агрегатов.

Форма спектра флуоресценции красителя в воде также не зависит от длины волны возбуждения. Максимум полосы испускания приходится на 737 нм. Кинетика затухания флуоресценции хорошо аппроксимируется одной экспонентой, время затухания составляет  $0,4 \pm 0,1$  нс. Форма спектра возбуждения флуоресценции не повторяет спектр поглощения, имея значительно меньшую интенсивность в области 657 нм, и сохраняется при изменении длины волны регистрации. Максимум спектра возбуждения располагается на 710 нм, что коррелирует по положению с максимумом полосы мономеров красителя. Это согласуется с тем, что Н-агрегаты индотрикарбоцианиновых красителей данного ряда не флуоресцируют.

В результате модификации структуры красителя путем введения трегалозы значительно ухудшилась его растворимость в малополярном ДХЭ. Получить растворы с ним удалось только в результате обработки ультразвуком взвеси красителя в ДХЭ с последующим осаждением нерастворенного осадка с помощью центрифуги. Даже при достаточно малой концентрации ( $\sim 10^{-7}$  М) спектр поглощения красителя в ДХЭ представляет собой широкую полосу с двумя максимумами – 740 нм и 677 нм. Полуширина полосы составляет 197 нм. Коротковолновые полосы располагаются на 364 нм и 445 нм.

Спектр флуоресценции красителя в дихлорэтаноле представлен одной полосой с максимумом на 758 нм и полушириной 62 нм, его форма не зависит от длины волны возбуждения. Кинетика затухания флуоресценции хорошо аппроксимируется одной экспонентой, длительность затухания флуоресценции составляет  $1,3 \pm 0,1$  нс. Степень поляризации при комнатной температуре постоянна в пределах всей полосы флуоресценции со значением  $10,7 \pm 0,8$  %. Квантовый выход флуоресценции составляет менее 1%. В ДХЭ также наблюдается не совпадение формы спектров поглощения и возбуждения флуоресценции при независимости от длины волны регистрации последнего. Максимум спектра возбуждения флуоресценции находится на 735 нм. Следовательно, во флуоресценции проявляется только длинноволновый центр. Принимая во внимание низкую растворимость нового красителя в ДХЭ и отсутствие флуоресценции, у коротковолнового центра, разумно утверждать, что пик с максимумом на 735 нм относится к мономерам красителя, а пик у 677 нм к агрегатам Н-типа. Сопоставляя положение максимумов полос поглощения и флуоресценции мономеров красителя с трегалозой в полярном этаноле и малополярном ДХЭ, важно отметить, что в результате модификации структуры красителя склонность к батохромному смещению поглощения и флуоресценции при переходе из полярного окружения в малополярное сохранилась.

В спектре поглощения красителя с трегалозой в растворе БСА при концентрации красителя 0,8 мкМ и БСА (0,08 %) максимум основной полосы поглощения приходится на 719 нм, ее полуширина составляет 118 нм. В присутствии молекул БСА происходит дезагрегация красителя, что проявляется в снижении интенсивности в пике агрегатов в ФСБ при той же концентрации. Коротковолновые полосы находятся при 358 и 439 нм.

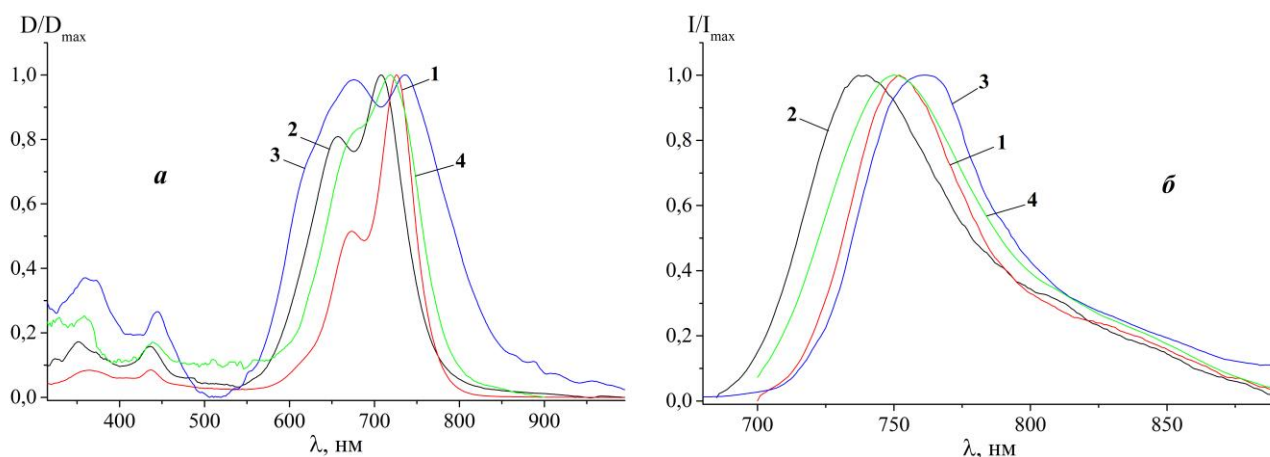


Рисунок 1 – Нормированные спектры (а) поглощения и (б) флуоресценции индотрикарбоцианинового красителя с трегалозой в средах:

1 – этанол, 2 – дистиллированная вода, 3 – дихлорэтан, 4 – водный раствор БСА

Спектр флуоресценции красителя в растворе БСА состоит из одной полосы с максимумом при 750 нм и полушириной 66 нм, форма которой постоянна при изменении длины волны возбуждения. Кинетика затухания флуоресценции хорошо описывается одной экспонентой, время затухания составляет  $1,1 \pm 0,1$  нс. Спектр возбуждения флуоресценции постоянен при изменении длины волны регистрации, его максимум располагается на 734 нм. Изменение фотофизических характеристик молекул красителя в присутствии БСА говорит об образовании комплексов с ним. Батохромное смещение спектра поглощения и флуоресценции красителя с трегалозой при взаимодействии с БСА указывает на то, что молекулы красителя переходят из сильно полярного водного окружения в малополярное при комплексообразовании с молекулами белка.

Таким образом, в результате модификации краситель с трегалозой утратил способность самоорганизованного образования  $H^*$ - и  $J$ -агрегатов в водных растворах, но не перестал агрегировать вовсе. По сравнению с красителем без трегалозы значительно снизилась растворимость в органических растворителях, причем его молекулы в таких средах стали склонны к агрегации. Для всех исследованных сред модификация структуры красителя не повлияла радикально на расположение основной полосы поглощения и полос флуоресценции. Их расположение по-прежнему попадает в терапевтическое окно прозрачности биотканей. На основании анализа фотофизических характеристик нового красителя в водных средах и в присутствии БСА установлено, что он способен образовывать комплексы с БСА.

#### Список литературы

1. A fluorogenic trehalose probe for tracking phagocytosed mycobacterium tuberculosis / T. Dai [et al.] // Journal of the American chemical society. – 2020. – Vol. 142, No 36. – P. 15259–15264.
2. Kamariza, M. Imaging mycobacterial thehalose glycolipids / M. Kamariza, P. Shieh, C. R. Bertozzi // Methods in enzymology. – 2018. – Vol. 598. – P. 355-369.
3. Photoactivatable glycolipid probes for identifying mycolate– protein interactions in live mycobacteria / H. W. Kavunja [et al.] // Journal of the American chemical society. – 2020. – Vol. 142, No 17. – P. 7725–7731.
4. Trehalose conjugation enhances toxicity of photosensitizers against mycobacteria / A. K. Dutta [et al.] // ACS Cent. Sci. – 2019. – Vol. 5, No 4. – P. 644–650.
5. Белько, Н. В. Управление  $H^*$ - и  $J$ -агрегацией индотрикарбоцианинового красителя в водных растворах неорганических солей / Н. В. Белько, М. П. Самцов, А. П. Луговский // Журн. Бел. гос. ун-та. Физика. – 2020. – № 2. – С. 19–27.

УДК 535.37+538.958

Самцов М. П.<sup>1</sup>, Луговский А. П.<sup>1</sup>, Белько Н. В.<sup>1</sup>, Тарасов Д. С.<sup>1</sup>, Воропай Е. С.<sup>1</sup>,  
Козобкова Н. В.<sup>2</sup>, Савицкий А. П.<sup>2</sup>, Шлеева М. О.<sup>2</sup>

## ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРЕГАЛОЗОЙ ТРИКАРБОЦИАНИН ДЛЯ ФОТОИНАКТИВАЦИИ *MYCOBACTERIUM SMEGMATIS*

<sup>1</sup> Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Россия

Результаты исследований впервые демонстрируют возможность *in vitro* фотоинактивации микобактерий на примере быстрорастущего родственника возбудителя туберкулеза – *Mycobacterium smegmatis* – путем использования фотосенсибилизаторов, активируемых излучением в ближнем инфракрасном диапазоне. Показано, что концентрация функционализированного трегалозой красителя в 3 – 4 раза выше в микобактериях по сравнению с незамещенным соединением, что обеспечивает существенное повышение эффективности фотоинактивации *M. smegmatis*.

Возбудитель туберкулеза – *Mycobacterium tuberculosis* – обладает способностью в неблагоприятных условиях образовывать покоящиеся формы, которые не только приобретают устойчивость ко всем известным антибактериальным препаратам, но способны десятилетиями сохранять жизнеспособность в организме человека и переходить в активное состояние и вызывать возобновление болезни. Распространение штаммов микобактерий с широкой и множественной лекарственной устойчивостью диктует необходимость разработки новых подходов к борьбе с этими заболеваниями. Одним из возможных подходов является метод фотодинамической инактивации, неспецифичность повреждающего действия которого препятствует появлению резистентности. В значительной мере применение этого метода ограничивается неглубоким проникновением используемого на практике света для возбуждения порфиринов, хлоринов, метиленовой сини. Эти соединения активируются излучением видимого диапазона. Использование фотосенсибилизаторов, которые активируются излучением ближнего инфракрасного диапазона (740 нм), в отношении микобактерий ранее не проводились.

Целью данной работы являлось разработка новой стратегии борьбы с микобактериями путем метода фотодинамической инактивации с применением фотосенсибилизаторов (ФС) на основе таргетированных к микобактериям трикарбоцианиновых красителей, способных вызывать фотодинамический эффект с использованием света с глубоким проникновением в ткани животных и человека.

Объектом данного исследования является непатогенный и быстрорастущий близкий генетический родственник возбудителя туберкулеза – *Mycobacterium smegmatis*. В качестве ФС - трикарбоцианиновый краситель **1**, содержащий две карбоксильные группы при концевых гетероостатках, а также красители **2** и **3**, обе карбоксильные группы которых этерифицированы низкомолекулярным полиэтиленгликолем или трегалозой соответственно. Красители **1** и **2** ранее показали высокую эффективность в отношении модельных опухолей экспериментальных животных *in vivo*. При увеличении длины волны фотовоздействия от 740 нм до 780 нм для таких ФС глубина некроза опухолевых тканей возрастает более чем в два раза. Функционализация красителя **3** трегалозой производилась с целью обеспечения комплексобразования ФС с компонентами клеточной стенки микобактерий.

Суточную культуру клеток *M. smegmatis*, для которой оптическая плотность составляла  $OD_{590} > 1$ , разбавляли средой NB до оптической плотности  $OD_{590} = 0,2$  и инкубировали с красителями в течение 2 ч при температуре 37°C в темноте при постоянном перемешивании. Облучение производилось излучением светодиода 740 нм (THORLABS, США) при плотности мощности 260 мВт/см<sup>2</sup>. Экспозиционная доза для образцов составляла 78, 234,

468 Дж/см<sup>2</sup>, что соответствовало времени облучения 5, 15 и 30 минут. Оценка жизнеспособности бактерий проводили путем высева на агаризованную среду NB методом разведений.

В результате выявлено, что при концентрации 40 мкМ красителя **2** и световой дозе 468 Дж/см<sup>2</sup> наблюдается значительная гибель клеток *M. smegmatis* (89%). При световой дозе 78 Дж/см<sup>2</sup> погибает 50 % бактериальных клеток. Использование гидрофобной формы ФС (красителя **1**) демонстрировало более выраженный фотодинамический эффект. При концентрации 40 мкМ красителя **1** и световой дозе 468 Дж/см<sup>2</sup> количество погибших клеток *M. smegmatis* составило 97 %, вероятно вследствие лучшего связывания ФС с гидрофобной стенкой микобактерий.

Проведены исследования фотофизических свойств красителей в суспензиях *M. smegmatis* после инкубации. При связывании с микобактериями максимум полосы поглощения всех исследованных ФС расположен на 742 нм, полуширина составляет 70 нм, максимум спектра флуоресценции расположен на 758 нм, полуширина составляет 41 нм. Выявлено комплексообразование молекул красителей с компонентами клеточной стенки микобактерий. На это указывает увеличение от 0,4 нс до 0,8 – 1,0 нс времени затухания флуоресценции красителей в суспензии с *M. smegmatis* по сравнению с раствором в фосфатно-солевом буфере. А также наблюдаемое bathochromное смещение спектров поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции красителей в *M. smegmatis* свидетельствует о низкой полярности микроокружения молекул красителей. Путем регистрации спектров поглощения в суспензии клеток *M. smegmatis* после инкубации с красителями и отмывки проведено исследование их накопления в бактериях *M. smegmatis*. Установлено, что концентрация красителя **3**, функционализированного трегалозой, в 3 – 4 раза выше по сравнению с незамещенным соединением **1**, т.е. лучше накапливается в микобактериях (Рисунок 1, а). Такое соотношение концентраций красителей в микобактериях согласуется с данными по фотоинаktivации *M. smegmatis* при воздействии излучением светодиода с длиной волны 740 нм (Рисунок 1, б). При использовании красителя **3** в качестве ФС после фотовоздействия происходит необратимое повреждение практически 100 % бактерий *M. smegmatis*.

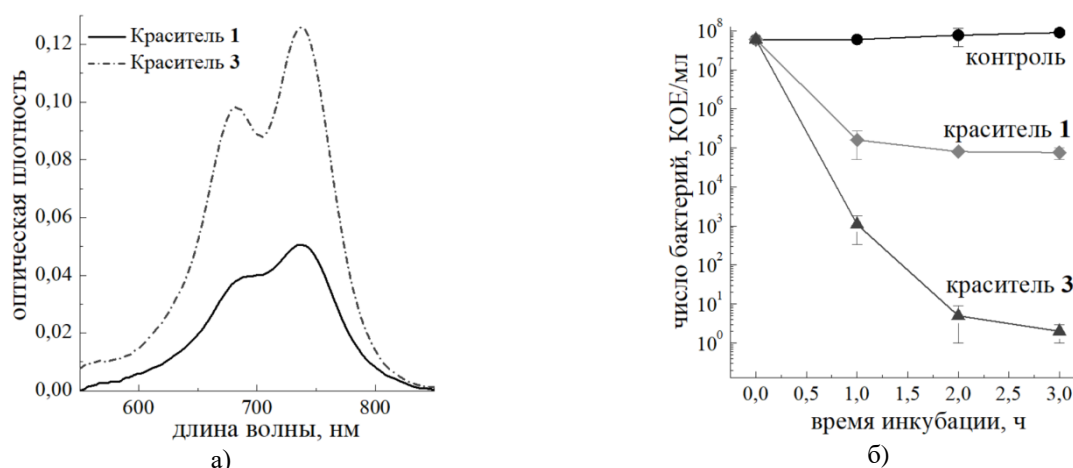


Рисунок 1 – а) Спектры поглощения красителей **1** и **3** в суспензии *M. smegmatis* после инкубации в течение 120 мин и трехкратной отмывки фосфатно-солевым буфером; б) Число бактерий *M. smegmatis* после воздействия излучением с длиной волны 740 нм в зависимости от времени инкубации клеток с красителями **1** и **3**.

Таким образом, проведенное исследование *in vitro* впервые демонстрирует возможность фотоинаktivации микобактерий на примере быстрорастущего родственника возбудителя туберкулеза – *M. smegmatis* – с использованием ФС, имеющих сродство к клеточной стенке микобактерий и активируемых излучением в ближнем инфракрасном диапазоне. Данное направление является перспективным для разработки методов борьбы с туберкулезом наряду с антибиотикотерапией.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СВЕТОВОГО ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Предложена приближенная двумерная аналитическая модель для описания стационарного монохроматического поля, возникающего в результате преломления гауссова светового пучка в прозрачную или слабопоглощающую однородную диэлектрическую среду. Ее формулы пригодны для описания пространственной структуры преломленного поля в широком диапазоне изменения углов падения, когда это поле характеризуется свободным распространением, полным внутренним отражением или экспоненциальным затуханием. Модель строится на основе асимптотического вычисления интеграла Фурье, которое учитывает возможные дифракционные эффекты первого и второго порядка.

Обычно при изучении и моделировании процессов распространения электромагнитного излучения в различных направляющих и преобразующих структурах используется модель плоской световой волны [1] или гауссова пучка [2], которая дополнительно описывает эффекты дифракционного уширения и искривления фазы при распространении на большие расстояния. Однако в условиях полного внутреннего отражения и сильного затухания эти стандартные модели непригодны для описания преломленного поля. Между тем для практиков крайне необходима простая теория, которая могла бы с единой точки зрения описывать пространственную структуру электромагнитного поля в многослойных диэлектриках не только в условиях свободного распространения, но и в случаях полного внутреннего отражения и скользящего преломления с затуханием по глубине преломляющей среды. Основой такой теории может служить модель преломления гауссова пучка на одной преломляющей границе двух диэлектрических сред при произвольных углах падения [3], которая рассматривается в данной работе.

Гауссов пучок – это электромагнитная полевая структура, профиль амплитуды которой в каждом поперечном сечении представляет собой гауссову функцию [2]:

$$u_0(x, y) = \frac{1}{\sqrt{1 + i\xi_0}} \exp\left(ik(\alpha_{0b}x + \beta_b y) - \frac{[y - x(\beta/\alpha_{0b})]^2}{w^2(1 + i\xi_0)}\right). \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина световой волны,  $\alpha_{0b}$  и  $\beta_b$  – параметры распространения пучка по координатным осям  $x$  и  $y$ , причем параметр  $\beta_b$  считается вещественным, а  $\alpha_{0b} = (\varepsilon_0 - \beta_b^2)^{1/2}$ ,  $\varepsilon_0 = n_0^2$  – вещественная диэлектрическая проницаемость среды,  $w = w_0/\cos \mathcal{G}$  – эффективная полуширина пучка в плоскости  $x = 0$ ,  $w_0$  – эффективная полуширина гауссовой кривой в поперечном сечении,  $\mathcal{G}$  – угол падения пучка на данную плоскость. Поле (1) может быть представлено в виде интеграла Фурье

$$u_0(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(\beta) \exp[ik(\alpha_0 x + \beta y)] d\beta, \quad (2)$$

где аргумент интегрирования  $\beta$  играет роль параметра распространения каждой плоскостолновой компоненты поля по тангенциальной оси  $y$ , а величина  $\alpha_0 = (\varepsilon_0 - \beta^2)^{1/2}$  – параметра распространения последней по нормальной оси  $x$  (рисунок 1),

$$U(\beta) = (p/\sqrt{\pi}) \exp[-p^2(\beta - \beta_b)^2(1 + i\xi_0)] - \quad (3)$$

фурье-образ поля в плоскости  $x = 0$ ,  $p = kw/2$  – спектральный параметр поля в этой плоскости,  $\xi_0 = L_0/(n_0 p_0 w_0)$  – параметр дифракционной расходимости пучка,  $L_0$  – расстояние, пройденное пучком в среде от перетяжки, где поперечное сечение пучка минимально, до плоскости  $x = 0$ .

Будем рассматривать преломление пучка (1) на плоской границе раздела  $x = 0$  двух сред с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$  (рисунок 1). Каждая плосковолновая компонента пучка преломляется независимо от других, поэтому результатом такого преломления оказывается поле [4]

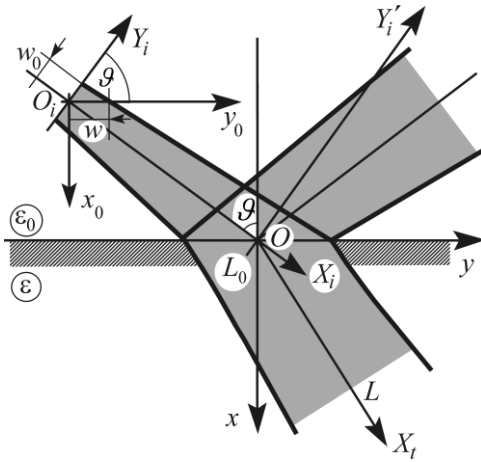


Рисунок 1 – Преломление светового пучка на границе двух диэлектрических сред [4].

$$u(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\beta) U(\beta) \exp[ik(\alpha x + \beta y)] d\beta \quad (4)$$

где  $\alpha = (\varepsilon - \beta^2)^{1/2}$  – новый параметр распространения такой компоненты по нормальной оси  $x$  во второй среде, проницаемость которой, вообще говоря, комплексная,  $T(\beta)$  – амплитудный коэффициент прохождения плосковолновой компоненты через плоскую междиэлектрическую границу  $x = 0$  [1]. Упрощающая аналитическая оценка интеграла (4) становится возможной при условии, что ширина светового пучка  $2w$  обычно значительно больше длины волны  $\lambda$ :  $p = \pi w/\lambda \gg 1$ . Данное условие означает, что эффективная ширина интервала интегрирования  $y$  интеграла (4) реально довольно узкая, и если имеет место разложение:

$$\alpha = \tilde{\alpha}^{(0)} - \tilde{\alpha}^{(1)}(\beta - \beta_b) - \tilde{\alpha}^{(2)}(\beta - \beta_b)^2 \quad (5)$$

то это позволяет применить для оценки интеграла (4)

асимптотический метод перевала [4]

$$u(x, y) \approx \frac{T(\beta_b)}{\sqrt{1+i\xi}} \exp \left\{ ik(\tilde{\alpha}_b x + \beta_b y) - \frac{(y - qx)^2}{w^2(1+i\xi)} + 2is \frac{x(y - qx)}{w^2} \right\}. \quad (6)$$

где  $\tilde{\alpha}_b = \tilde{\alpha}^{(0)}$ ;  $\xi = \xi_0 + 2(x/w)(\tilde{\alpha}^{(2)}/p)$ ;  $s = \text{Im} \tilde{\alpha}^{(1)}$ ;  $q = \text{Re} \tilde{\alpha}^{(1)} + s\xi$ . Величины  $\tilde{\alpha}^{(0)}$  и  $\tilde{\alpha}^{(1)}$  могут быть комплексными, а величина  $\tilde{\alpha}^{(2)}$  – только вещественной. В прозрачной среде и при углах падения  $\vartheta$ , заметно меньших критического угла, т.е. угла полного внутреннего отражения, когда величина  $\alpha$  вещественная и заметно отличается от нуля, разложение (5) будет соответствовать усеченному тейлоровскому представлению функции  $\alpha$  до второго порядка включительно, для которого

$$\tilde{\alpha}^{(0)} = \alpha(\beta_b) = \sqrt{\varepsilon - \beta_b^2} \equiv \alpha_b; \quad \tilde{\alpha}^{(1)} = \beta_b/\alpha_b; \quad \tilde{\alpha}^{(2)} = \varepsilon/(2\alpha_b^3), \quad (7)$$

и тогда асимптотическая оценка (6) с точностью до множителя  $T(\beta_b)$  принимает вид обычного гауссова пучка (1), только с другими параметрами, характерными для новой среды. Это случай свободного распространения пучка, описанный в литературе. Однако если угол падения пучка приближается к критическому значению ( $\beta_b \rightarrow (\text{Re} \varepsilon)^{1/2}$ ) и величина  $\alpha_b$  становится очень малой или вообще стремится к нулю, то такое представление оказывается некорректным вследствие того, что квадратичное приближение (5), (7) для функции  $\alpha = (\varepsilon - \beta^2)^{1/2}$  будет слишком неточным. Чтобы обойти эту трудность, в работе [3] было предложено использовать искусственный прием введения комплексной фиктивной добавки к диэлектрической проницаемости преломляющей среды, который позволяет сглаживать резкий переход через нуль функции  $\alpha$  с ростом угла падения (параметра  $\beta$ ) от вещественных ее значений к чисто мнимым. Более того, для получения оптимальной аппроксимации необходимо использовать три разные фиктивные добавки к проницаемости  $\varepsilon$  для трех разных коэффициентов квадратичного представления (5):

$$\tilde{\alpha}^{(0)} = \sqrt{(\varepsilon + \Delta\varepsilon^{(0)}) - \beta_b^2}; \quad \tilde{\alpha}^{(1)} = \frac{\beta_b}{\sqrt{(\varepsilon + \Delta\varepsilon^{(1)}) - \beta_b^2}}; \quad \tilde{\alpha}^{(2)} = \frac{\text{Re} \varepsilon}{2 [(\text{Re} \varepsilon - \beta_b^2)^2 + (\Delta\varepsilon^{(2)})^2]^{3/4}}, \quad (8)$$

где фиктивные добавки  $\Delta\varepsilon^{(0)}$  и  $\Delta\varepsilon^{(1)}$  комплексные, а третья добавка  $\Delta\varepsilon^{(2)}$  должна быть вещественной. Числовые коэффициенты и параметры, определяющие функциональную зависи-

мость этих добавок от эффективной полуширины пучка  $w$  и угла его падения на границу, т.е. от параметра  $\beta$ , приведены в работе [3]. Они определялись путем простого подбора на основе критерия наилучшего совпадения пространственной структуры поля, даваемой приближенным решением (6), (8), и точным решением, получаемым с помощью прямого вычисления интеграла (4) численными методами [4]. Величина фиктивных добавок максимальна в области изменения параметра распространения пучка  $\beta_b$  вблизи полного внутреннего отражения, но с увеличением его отклонения от критического значения она уменьшается до нуля. Для сравнения на рисунке 2 приведены результаты точного и приближенного расчетов пространственной структуры преломленного поля для трех различных значений угла падения вблизи области полного внутреннего отражения.

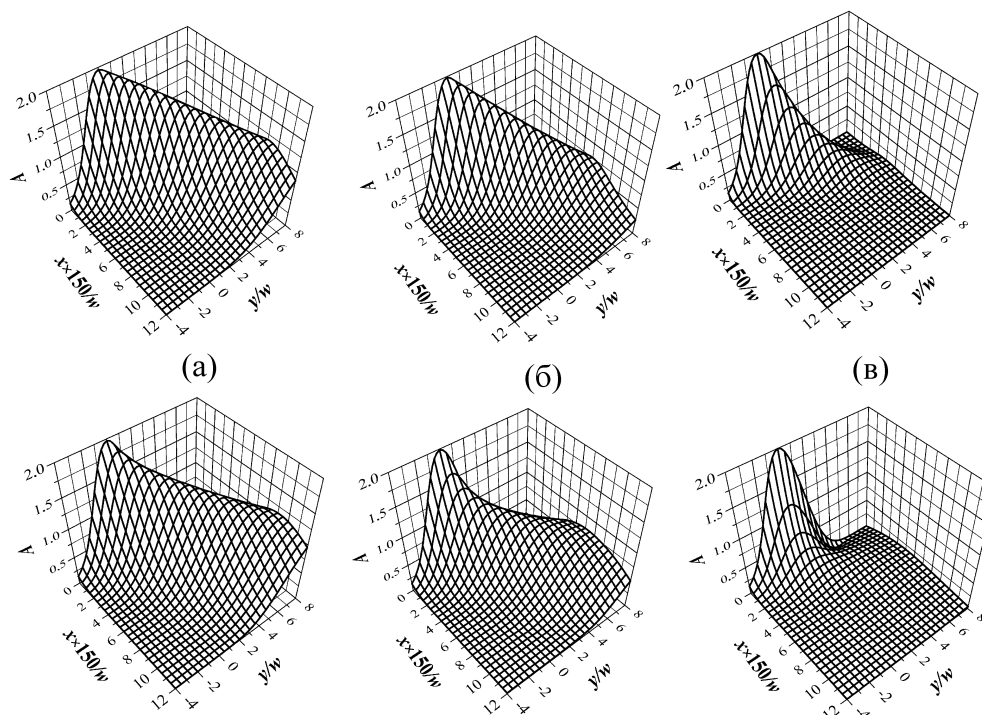


Рисунок 2 – Пространственное распределение амплитуды поля преломления гауссова пучка у границы прозрачных сред с показателями преломления 1,6 и 1,4 при  $w_0/\lambda = 2 \cdot 10^3$ , рассчитанное с помощью приближенного [3] (вверху) и точного [4] (внизу) решений для трех различных значений угла падения пучка на границу, когда он меньше критического на  $10^\circ$  (а), равен критическому (б), и больше критического на  $20^\circ$  (в). Масштаб по нормальной оси  $x$  увеличен в 150 раз по сравнению с масштабом по тангенциальной оси  $y$ .

Таким образом, приближенное решение, определяемое выражениями (6), (8) и параметрами фиктивных добавок  $\Delta\varepsilon^{(m)}$  ( $m = 0; 1; 2$ ), приведенными в [3], вполне адекватно описывает пространственную структуру поля, возникающего в результате преломления гауссова пучка на плоской границе раздела двух диэлектрических сред в различных режимах преломления.

Работа поддерживается Государственной программой научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция–2025» в рамках подпрограммы 11.3 «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии».

#### Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Маркузе Д. Оптические волноводы. – М.: Мир, 1974. – 576 с.
3. Serdyuk V. M. Approximate analytical model of the refracted field of the Gaussian light beam on a plane dielectric interface // Opt. Commun. – 2023. – Vol. 535. – 129310.
4. Serdyuk V. M. Spatial structure of the refracted field of a Gaussian light beam at total internal reflection // Journ. Opt. Soc. Amer. A. – 2022. – Vol. 39, Issue 11. – P. 2083–2089.

## АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧИСЛА ФОТООТСЧЕТОВ В СКАНИРУЮЩЕЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Предложен метод анализа пространственного распределения числа фотоотсчетов в системах одноквантовой флуоресцентной спектроскопии. Метод справедлив для эргодических систем и основан на применении теории анализа временных распределений числа фотоотсчетов. Эффективность разработанного метода подтверждена в ходе анализа экспериментальных данных, полученных в сотрудничестве с кафедрой молекулярной цитологии университета Амстердама.

**Введение.** Флуоресцентная флуктуационная спектроскопия (ФФС) – это совокупность методов, позволяющих исследовать физико-химические параметры растворов молекулярных соединений на основе статистического анализа флуктуаций интенсивности флуоресценции в условиях термодинамического равновесия [1]. Источником флуктуаций интенсивности является изменение числа и положения флуоресцентных молекул в открытом объеме регистрации, локализованным лучом лазера, сфокусированным с помощью объектива с большой числовой апертурой (1.2 NA и более). В этом случае измерения производятся в предельно малом (менее 1 фл) неоднородно освещенном объеме. Методы ФФС обладают недостижимой для других методов чувствительностью, отсутствием разрушающего воздействия на исследуемый образец и возможностью исследовать вещество на одномолекулярном уровне.

Анализ распределений числа фотоотсчетов (РЧФ), зарегистрированных в течение некоторого короткого временного интервала регистрации  $T$  позволяет найти характеристическую яркость флуоресцентных молекул и их концентрацию, и, соответственно, разрешать смесь веществ с разным квантовым выходом [2–4]. Анализ РЧФ также предоставляет возможность разрешать смесь веществ, отличающихся только по индексу стехиометрии, например, смесь мономер-димер [5], что в свою очередь предоставляет возможность исследования *in-vivo* процессов димеризации и изомеризации [1, 5].

Для анализа РЧФ в ФФС к настоящему времени предложено несколько методов. Наиболее известным из них является метод анализа гистограмм числа фотонов (Photon Counting Histogram – PCH) [2]. Метод PCH был разработан для анализа результатов одноточечных измерений, где флуктуации флуоресценции регистрируются во времени из одной точки, сфокусированной в объеме исследуемого вещества. Современные конфокальные лазерные микроскопы оснащены сканирующей оптикой, позволяющей проводить не только одноточечные измерения, но и в процессе сканирования получать пространственные флуоресцентные изображения исследуемого образца, что определило широкую распространенность данной методики. Результатом измерений является стек изображений, где уже произведен подсчет количества фотонов, попавших в каждый пиксель формируемого изображения. Для оценки параметров исследуемого вещества на основе стека изображений разработан и широко используется метод Number & Brightness (N&B) [6]. В методе N&B среднее количество молекул в объеме наблюдения определяется как отношение квадрата средней интенсивности пикселей изображения к дисперсии, а яркость – как отношение дисперсии к средней интенсивности. Таким образом, оценки яркости и количества молекул получаются лишь на основе первого и второго моментов РЧФ, вычисленных на основе пикселей изображения. Фактически, данный метод является лишь способом генерации начальных приближений [7] для метода PCH в самом упрощенном виде в предположении наличия одной компоненты исследуемого вещества без учета фонового шума, внефокусной засветки и других инструментальных искажений. В тоже время, если образец представляет собой однородный раствор исследуемого вещества, то каждый пиксель изображения можно рассматривать как отдельный временной интервал регистрации. Если исследуемая система обладает эргодическими свой-



ствами, что характерно для широкого круга исследуемых систем, мы можем применить теорию хорошо зарекомендовавшего себя метода РСН для анализа стеков изображений, полученных в сканирующем эксперименте. Назовем этот новый метод как метод SPCH (Space PCN).

**Метод SPCH.** Как и в методе РСН для вычисления РЧФ, зарегистрированных от двух и более молекул, будем использовать последовательное вычисление конволюций одно-молекулярного распределения числа фотоотчетов  $p^{(1)}(n, q)$  [2]

$$p^{(1)}(n, q) = \frac{1}{Q\sqrt{\pi n}} \int_0^\infty \gamma(n, qTe^{-2x^2}) dx, n = 1, 2, \dots, \quad p^{(1)}(0, q) = 1 - \sum_{n=1}^m p^{(1)}(n, q) \quad (1)$$

где  $\gamma(n, x)$  неполная гамма-функция,  $q$  характеристическая яркость, определяемая количеством фотонов, испущенных одной молекулой в единицу времени (count per second per molecule, cps),  $Q$  константа, требуемая для нормировки распределения. Распределение РЧФ  $P(n)$  от числа молекул  $N$  концентрации  $C$  в открытом объеме наблюдения  $V_{eff}$ ,  $N = CV_{eff}$ ,  $V_{eff} = (\int_V B(\mathbf{r}) d\mathbf{r})^2 / \int_V B^2(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$  есть сумма одно-молекулярных распределений  $p^{(1)}(n, q)$ , свернутых между собой  $j - 1$  раз и взвешенных на вероятность нахождения  $j = 0, 1, \dots$  молекул в объеме наблюдения (по распределению Пуассона с параметром  $QN$ ) [2]

$$P(n, N, q) = \sum_{j=0}^{\infty} p^{(j)}(n, q) Poi(j, QN), \quad (2)$$

$$p^{(j)}(n, q) = \underbrace{p^{(1)} \otimes \dots \otimes p^{(1)}}_{j-1 \text{ раз}}(n, q), \quad p^{(0)}(n, q) = \begin{cases} 1, & n = 0, \\ 0, & n \neq 0. \end{cases}$$

При однофотонном возбуждении функция профиля засветки  $B(\mathbf{r})$  аппроксимируется трехмерным асимметричным распределением Гаусса, вытянутым по оси  $z$ .

**Материалы.** Для тестирования метода были проведены измерения раствора молекул зеленого флуоресцирующего белка (экспериментальные данные предоставлены кафедрой молекулярной цитологии университета Амстердама). Все измерения были выполнены с помощью лазерного сканирующего инвертированного конфокального микроскопа Olympus Fluoview FV1000 с системой регистрации PicoHarp 300 (PicoQuant, Berlin). Измерения были произведены для одного и того же образца в сканирующем и одноточечном режимах. В одноточечном режиме измерение длилось 125 с. Всего было зарегистрировано  $1.1 \times 10^6$  фотонов. В сканирующем режиме получен стек из 100 изображений 128 на 128 пикселей с временем регистрации фотонов для одного пикселя 100 мкс. Линейный пространственный размер одного пикселя составлял приблизительно 100 нм. Количество зарегистрированных фотонов составило  $1.2 \times 10^6$ .

**Результаты.** Для сравнения результатов анализа РЧФ, рассчитанных по пространству для сканирующего измерения и анализа РЧФ, вычисленного во времени для одноточечного измерений, РЧФ для одноточечного эксперимента рассчитывалось с длительностью интервала регистрации  $T = 1 \times 10^{-4}$  с, равному времени регистрации фотонов для одного пикселя в стеке изображений. В соответствии с идеей применения метода РСН для анализа пространственного распределения числа фотоотчетов, где каждый пиксель соответствует одиночному счетному временному интервалу, для каждого фрейма строилась гистограмма интенсивностей пикселей изображения. Соответственно, для сканирующего измерения было получено 100 РЧФ.

Теоретическое РЧФ находилось по формулам (1), (2). Анализ РЧФ по методам РСН и SPCH основан на методе наименьших квадратов с оптимизацией Левенберга-Марквардта и предполагает аппроксимацию экспериментально полученного РЧФ моделью (1), (2) [7]. Качество аппроксимации проверялось путем вычисления значения взвешенного критерия  $\chi^2$  и визуальным анализом остатков. Стандартные отклонения оцениваемых параметров при анализе одноточечного измерения находились по методу асимптотических стандартных ошибок

(АСО) при доверительной вероятности 0.95 [7]. Гистограммы оценок яркости  $q$  и количества молекул в эффективном объеме наблюдения  $N$ , полученных в результате применения методов SPCH и N&B при анализе пространственных РЧФ приведены на рисунке 1. Средние значения и стандартные отклонения оценок  $q$  и  $N$  приведены в таблице 1. Выбросы  $q$  и  $N$ , определенные стандартным способом как превышающие 3 стандартные отклонения относительно медианы, были исключены из подсчета средних (6 для метода SPCH и 4 для N&B). Результаты анализа одноточечного РЧФ также приведены в таблице для сравнения. При анализе одноточечного измерения получено значение критерия  $\chi^2 = 0.89$  и равномерное распределение остатков относительно нуля (данные не приведены), что свидетельствует об хорошем качестве аппроксимации. Качество аппроксимации пространственных РЧФ также является удовлетворительным: разброс остатков не превышает 3 стандартных отклонений (данные не представлены), среднее значение критерия равно 1.1.

Таблица 1

Результаты анализа РЧФ

Параметр	SPCH	Одноточечное измерение	N&B
$N$	18.84±6.29	16.49±0.87	18.17±5.63
$q$ , cps	1159±423	1454±77	1235±382

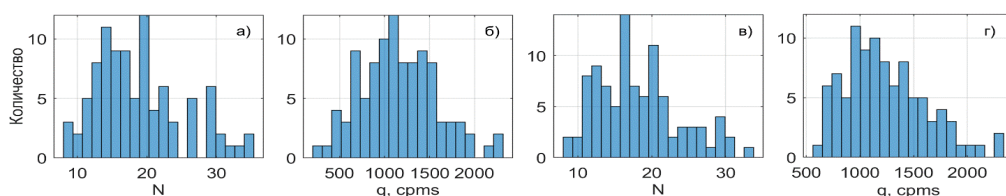


Рисунок 1. Гистограммы оценок яркости и количества молекул в эффективном объеме наблюдения, полученные: а) и б) – при анализе методом SPCH, в) и г) – при анализе методом N&B.

**Закключение.** В работе предложен новый метод анализа пространственных распределений числа фотоотсчетов для эргодических систем. Эффективность работы метода SPCH подтверждена в ходе сравнительного анализа с методами PCH и N&B. Оценки яркости и концентрации молекул хорошо согласуются друг с другом для всех трех методов. Это подтверждает гипотезу об эргодичности исследуемой системы и позволяет сделать вывод о возможности применения теории метода PCH для анализа пространственных РЧФ, рассчитанных на основе стека изображений.

#### Список литературы

1. Kitamura, A. State-of-the-Art Fluorescence Fluctuation-Based Spectroscopic Techniques for the Study of Protein Aggregation / A. Kitamura, M. Kinjo // *Int J Mol Sci.* – 2018. – 19, 964.
2. Huang, B. Photon counting histogram: One-photon excitation / B. Huang, T. D. Perroud, R. N. Zare // *ChemPhysChem.* – 2004. – 5(10). – P. 1523–1531.
3. Kask, P. Fluorescence-intensity distribution analysis and its application in biomolecular detection technology / P. Kask, K. Palo, D. Ullmann, K. Gall // *Proc Natl Acad Sci USA.* – 1999. – 96(24). – P. 13756–13761.
4. Скаун, В.В. Анализ распределения числа фотоотсчетов с коррекцией профиля засветки в одномолекулярной флуктуационной спектроскопии / В. В. Скаун, В. В. Апанасович // *Вестн. Беларус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика.* – 2008. – № 2. – С. 31–35.
5. Nederveen-Schippers, L. M. Combined FCS and PCH Analysis to Quantify Protein Dimerization in Living Cells / L.M. Nederveen-Schippers *et al* // *Int J Mol Sci.* – 2021. – 22, 14.
6. Digman, M. A. Mapping the Number of Molecules and Brightness in the Laser Scanning Microscope / M.A. Digman, R. Dalal, A.F. Horwitz, E. Gratton // *Biophys J.* – 2008. – 94(6), 2320.
7. Skakun, V.V. Global analysis of autocorrelation functions and photon counting distributions in fluorescence fluctuation spectroscopy / V.V. Skakun, A.V. Digris, and V.V. Apanasovich // *Methods in Molecular Biology.* – 2014. – 1076. – P. 719–741.

УДК 537.531.2

Сорокиков М. Н., Зверев Д. А., Баранников А. А., Юнкин В. А., Серегин А. Ю.,  
Волковский Ю. А., Просеков П. А., Снигирёв А. А.

## **УСТРОЙСТВО ДВУМЕРНОЙ ФОКУСИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СОСТАВНЫХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ЛИНЗ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»,  
Калининград, Россия

Представленная работа посвящена разработке, изготовлению и испытанию устройства двумерной фокусировки рентгеновского излучения с возможностью коррекции астигматизма оптической системы. Предложен новый метод формирования осесимметричного пучка с использованием двух планарных кремниевых составных преломляющих линз. Такой подход позволяет гибко настраивать параметры фокусировки, задавая желаемую форму сфокусированного пятна. Разработанное устройство может быть использовано как для диагностики синхротронного источника излучения, так и для подготовки рентгеновского пучка в методах когерентной рентгеновской визуализации. При этом, возможность коррекции астигматизма оптической системы позволяет полностью избежать ограничений пространственного разрешения сканирующих методов исследования, связанных с асимметрией формы синхротронного источника излучения.

Синхротронное излучение является важнейшим инструментом для решения фундаментальных и прикладных научных задач в медицине, биологии, химии, физике, электронике, метрологии и материаловедении. Уникальные свойства синхротронного излучения позволяют изучать внутреннюю структуру микроскопических объектов без разрушения исследуемого образца, расшифровывать сложные структуры белков, анализ которых невозможен другими методами, исследовать свойства веществ находящихся в экстремальных условиях при высоком давлении и температуре, а также наблюдать элементарные физические и химические процессы в реальном времени. Возможность реализации подобных исследований на синхротроне во многом обусловлена развитием рентгеновской оптики, способной полностью раскрыть потенциал новых лазероподобных рентгеновских источников.

В представленной работе рассматривается устройство двумерной фокусировки рентгеновского излучения с возможностью коррекции астигматизма оптической системы. В основе разработанного устройства используются планарные кремниевые составные преломляющие линзы [1,2]. Данный вид оптики представляет собой чипы с интегральными линзовыми системами, сформированными на пластинах монокристаллического кремния методом глубокого анизотропного плазменного травления [3]. Чипы и концепция, лежащая в их основе в комплексе с планарной технологией микроэлектроники и микросистем, были разработаны совместно с Институтом проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН) (г. Черноголовка, Россия). Уникальность данного вида оптики состоит в том, что она позволяет разместить на пластине размером менее двух сантиметров десятки наборов составных преломляющих линз (СПЛ), каждый из которых может содержать различное количество единичных линз.

Рентгенооптическое устройство для обеспечения двумерной фокусировки рентгеновского пучка с возможностью коррекции астигматизма оптической системы состоит из двухкоординатной системы, ограничивающей входную апертуру и вертикальной и горизонтальной систем фокусировки (Рисунок 1). Для формирования двумерной фокусировки используются планарные кремниевые СПЛ, которые расположены друг за другом вдоль оптической оси, фокусирующие рентгеновское излучение в вертикальном и горизонтальном направлениях. Юстировка каждого кремниевого чипа производится независимо, что позволяет гибко менять параметры системы фокусировки. Точность линейных и угловых перемещений устройства обеспечивается за счет использования высокоточных моторизованных подвиж-

ных элементов: оси линейного позиционирования с точностью  $\leq 1$  мкм и позиционирование углового положения с точностью  $\leq 0.2^\circ$ .



Рисунок 1 – Рентгенооптическое устройство на основе планарных кремниевых СПЛ.

Сборка, настройка и юстировка рентгенооптического устройства произведена на базе многофункционального комплекса подготовки и проведения синхротронных исследований «SynchrotronLike» – УНУ «SynchrotronLike» БФУ им. И. Канта (г. Калининград, Россия).

Синхротронные испытания рентгенооптического устройства проводились на исследовательской станции «Рентгеновская кристаллография и физическое материаловедение» Курчатовского источника синхротронного излучения (РКФМ «КИСИ – Курчатов») второго поколения при энергии излучения  $E = 12.4$  кэВ. Оптическая схема эксперимента представлена на рисунке 2.

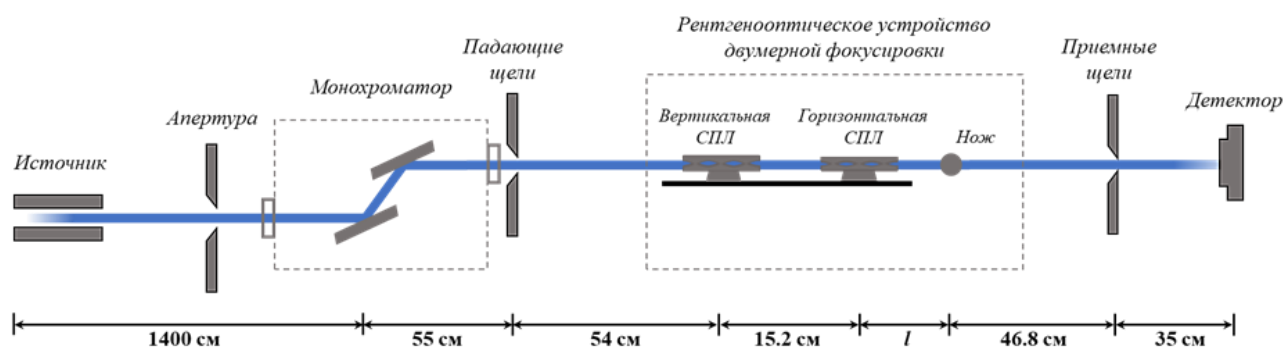


Рисунок 2 – Оптическая схема синхротронных испытаний рентгенооптического устройства на станции РКФМ «КИСИ – Курчатов».

Расположение линз вдоль пучка определялось таким образом, чтобы фокальные плоскости вертикальной и горизонтальной СПЛ были совмещены. Для регистрации сфокусированного рентгеновского пучка использовался метод ножевого сканирования. В методе ножевого сканирования в качестве образца использовался рентгеновский нож диаметром 250 мкм, представляющий собой латунную проволоку. Сканирование сфокусированного пучка выполнялось с шагом 100 нм. Регистрация данных эксперимента по изучению оптических свойств системы двумерной фокусировки происходила с использованием рpи-диода (детектор).

Для обеспечения фокусировки в вертикальном направлении была выбрана СПЛ, состоящая из  $N = 6$  одиночных линз, а в горизонтальном из  $N = 58$  одиночных линз. При энергии  $E = 12.4$  кэВ рассматриваемые линзы имели фокусные расстояния около 165 мм и 17 мм. С учетом размеров источника ( $100 \times 1000$  мкм) теоретические размеры сфокусированного пуч-

ка, формируемого СПЛ, составляли  $1.29 \times 1.19$  мкм в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Полученная в результате эксперимента полная ширина на полувысоте (FWHM) профиля интенсивности полученного сфокусированного пучка при двумерной фокусировке с применением метода ножевого сканирования составила  $1.6 \pm 0.5$  мкм по вертикали и  $1.8 \pm 0.5$  мкм по горизонтали, что полностью соответствовало теоретическим оценкам (Рис.3). Следует отметить, что сфокусированный пучок имеет практически одинаковые размеры в вертикальном и горизонтальном направлениях, что подтверждает возможность коррекции астигматизма оптической системы при помощи разработанного устройства.

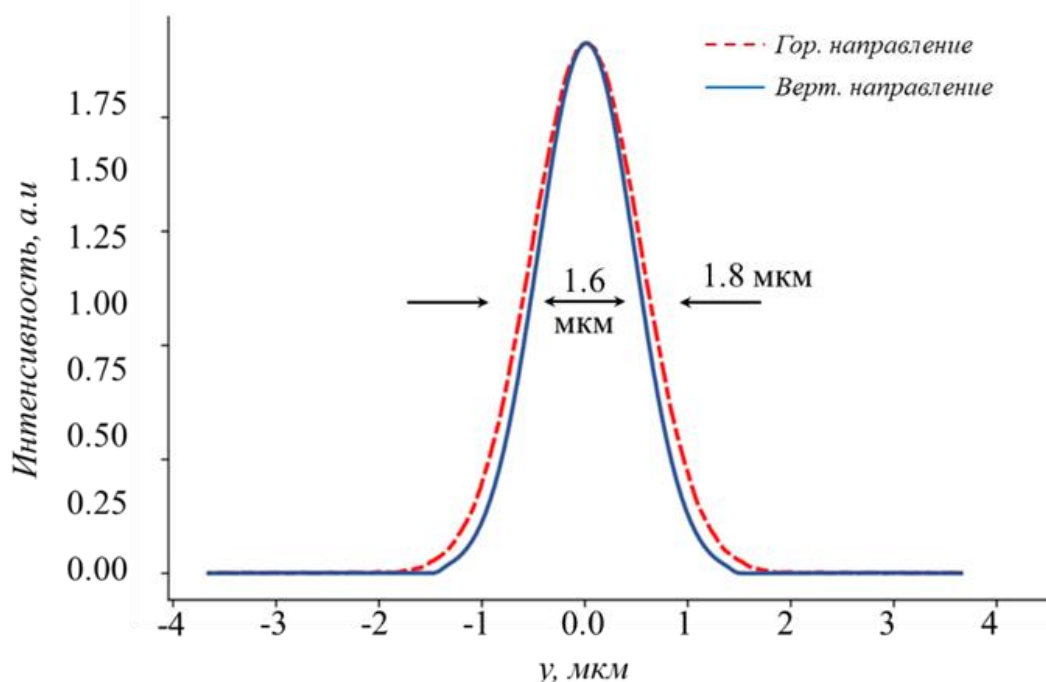


Рисунок 3 – Результаты эксперимента двумерной фокусировки рентгенооптическим устройством на основе планарных кремниевых составных преломляющих линз.

Рентгенооптическое устройство на основе планарных кремниевых составных преломляющих линз уже сегодня используется на станции РКФМ «КИСИ – Курчатов» и имеет огромный потенциал практического применения на новых источниках рентгеновского излучения. Разработанное устройство может быть использовано как для диагностики синхротронного источника излучения, так и для подготовки рентгеновского пучка в методах когерентной рентгеновской визуализации. При этом, возможность коррекции астигматизма оптической системы позволяет полностью избежать ограничений пространственного разрешения сканирующих методов исследования, связанных с асимметрией формы синхротронного источника излучения. Конструкция устройства в сочетании с продуманной компоновкой элементов, позволяет производить двумерную фокусировку рентгеновского пучка с заданными параметрами (размер фокуса и фокусное расстояние) в широком диапазоне энергии рентгеновского излучения (от 10 до 80 кэВ).

#### Список литературы

1. A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva, B. Lengeler. Nature. V. 384. № 6604. 49 (1996).
2. A. Snigirev, I. Snigireva, M. Grigoriev, V. Yunkin. Advances in X-Ray/EUV Optics and Components II 6705, 670506 (2007).
3. V. Yunkin, M. Grigoriev, S. Kuznetsov, A. Snigirev, I. Snigireva, Proc. SPIE 5539, Design and Microfabrication of Novel X-Ray Optics II, 226 (2004).

УДК 535.37

Тарасов Д. С.<sup>1,2</sup>, Самцов М. П.<sup>1</sup>, Радько А. Е.<sup>1</sup>, Красноперов Н. Н.<sup>1</sup>,  
Шевченко К. А.<sup>1</sup>, Воропай Е. С.<sup>2</sup>

## ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ АНАЛИЗА КИНЕТИКИ ЗАТУХАНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРА

<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ,  
Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Разработан программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции, полученной по методу время-коррелированного счета фотонов. Программный модуль «ФлуоТау» позволяет аппроксимировать кинетику затухания флуоресценции моделью до 5 экспонент, имеет большую гибкость в настройке начальных и граничных условий аппроксимации.

Люминесцентный анализ один из наиболее информативных спектральных методов исследования объектов в различных областях науки. В последние два десятилетия с развитием аппаратуры для измерения временных характеристик свечения люминесценции его применение значительно расширилось. Эталонным методом для получения кинетики затухания сегодня стал метод время-коррелированного счета фотонов. Прежде всего это обусловлено появлением мегагерцовых импульсных лазерных источников с субнаносекундной и пикосекундной длительностью, а также развитием микроэлектронной базы. В лаборатории спектроскопии НИИПФП им. А.Н. Севченко выполняется разработка лазерного спектрофлуориметра для спектрально-кинетического люминесцентного анализа в экспериментальной физике и биологии. Измерения кинетических характеристик флуоресценции предполагается реализовать по методу время-коррелированного счета фотонов. На данном этапе проекта разработаны прототипы/макеты отдельных узлов спектрофлуориметра: импульсных светодиодных и лазерных источников, время-амплитудного преобразователя (ВАП), схемы временной привязки (СВП), блока управления, одноканального и КМОП-многоканального фотоприемных устройств (ОФУ и МФУ). Параллельно ведется разработка программного обеспечения (ПО) для объединения отдельных узлов в единый программно-аппаратный комплекс, включая программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции. На базе спектрофлуориметра Fluorolog (SPEX, США) создан макет для апробации отдельных узлов и тестирования ПО.

Известно, что для однокомпонентных систем характерным является одноэкспоненциальный закон затухания флуоресценции для молекулярной системы. В случае нескольких невзаимодействующих флуоресцирующих центров закон затухания будет представлен суммой экспонент:

$$I(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (1)$$

где  $N$  – число различных флуоресцирующих центров.

Поскольку длительности возбуждающего импульса и отклика регистрирующей фотосистемы нередко сопоставимы с временем затухания флуоресценции исследуемых объектов, то регистрируемый сигнал флуоресценции в момент времени  $t$  представляет собой свертку вида:

$$F(t) = \int_0^t G(t') I(t-t') dt' \quad (2)$$

где  $G(t)$  – аппаратная функция, которая определяется как отклик системы регистрации на возбуждающий световой импульс.

Закон затухания флуоресценции исследуемых молекул можно установить путем решения задачи деконволюции, т.е. нахождения из интегрального уравнения (2), функцию  $I(t)$ . Для расчёта параметров  $\alpha_i$  и  $\tau_i$  полученных на основании анализа экспериментальных кривых предложено достаточно много различных методов [1, 2]. В этом отношении наиболее надёжно себя показал метод наименьших квадратов [3]. В его основе минимизация функционала  $\chi^2$ , который представляет собой взвешенное среднеквадратичное отклонение рассчитанного закона затухания флуоресценции  $F_{расч}(t_i)$  от зарегистрированного  $F_{эксн}(t_i)$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n w_i [F_{эксн}(t_i) - F_{расч}(t_i)]^2, \quad (3)$$

где  $w_i$  весовые коэффициенты:

$$w_i = \frac{1/F_{эксн}(t_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/F_{эксн}(t_i)}. \quad (4)$$

Данный подход принят за основу для используется в разработанном программном модуле «ФлуоТау». Поиск параметров экспонент функции реализован в виде итерационного алгоритма. Принимая во внимания нелинейную зависимость функционала  $\chi^2$  от  $\tau_i$ , для ускорения вычислений использован метод Левенберга-Марквардта для нелинейного метода наименьших квадратов. В качестве варьируемых параметров в модель оптимизации также включен временной сдвиг между аппаратной функцией и кинетикой затухания флуоресценции образца. Программный модуль выполнен в виде оконного приложения для системы Windows (рисунок 1). На главной форме располагаются основные элементы управления (предварительный анализ кинетики, параметры модели аппроксимации, сглаживание) и отображения результата расчета включая статистические параметры для оценки качества аппроксимации.

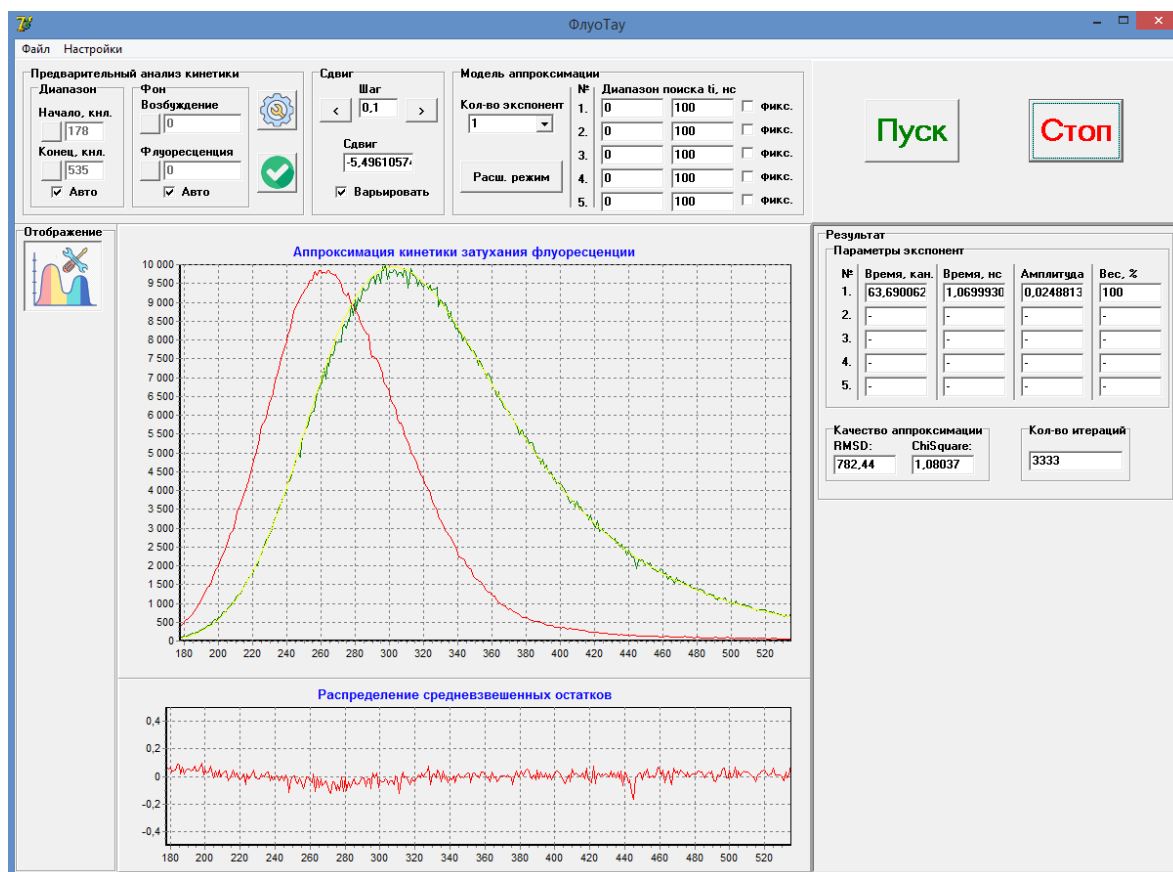


Рисунок 1 – Вид главного окна программного модуля «ФлуоТау»

Следует отметить, что в литературных источниках описывается только общий принцип алгоритма. Детали реализации алгоритма (например, выбор начальных и граничных условий, выделение области анализа, определение критерия останова циклов и т.д.) в литературе зачастую отображены недостаточно. При этом данный алгоритм обладает высокой чувствительностью к выбранным начальным параметрам [4]. В результате программная реализация алгоритма стала отдельной исследовательской задачей.

В программном модуле «ФлуоТау» реализован также расширенный режим аппроксимации. В данном режиме имеется возможность регулировать область поиска времени затухания флуоресценции для одного или нескольких центров (в том числе его фиксации). С одной стороны, это позволяет учесть сигнал флуоресценции от примесей с известным временем затухания флуоресценции. С другой стороны, такой подход более гибкий при исследовании сложных многокомпонентных флуоресцирующих систем, в которых имеется некоторая исходная информация о фотофизических свойствах отдельных центров. Примером такой системы является комплексообразование флуоресцентных зондов с биомакромолекулами в биообъектах.

В процессе разработки программного модуля «ФлуоТау» корректность работы алгоритма расчета проверена на сгенерированных модельных данных в виде свертки известной аппаратной функции и теоретического закона затухания, представленного суммой нескольких экспонент с известными временами затухания и весами (амплитудами). В полученные кинетики дополнительно добавлялась шумовая компонента с разным уровнем шума. В результате анализа с помощью программного модуля «ФлуоТау» с использованием моделей аппроксимации от 1 до 5 экспонент наилучший результат аппроксимации достигался при совпадении количества экспонент в моделях генерации исходных данных и их аппроксимации. При этом расхожимость времен затухания в моделях не превышала 3 %, что подтверждает корректность работы алгоритма.

С использованием макета на базе спектрофлуориметра Fluorolog проведена апробация отдельных узлов лазерного спектрофлуориметра. Зарегистрированы кинетики затухания различных образцов с известными в литературе временами затухания флуоресценции (растворы красителей родамин 6Ж и НИТС в этаноле). В результате аппроксимации полученных кинетик с помощью стандартного режима программного модуля «ФлуоТау» получены времена затухания флуоресценции, которые в пределах погрешности совпадают со значениями в литературе: родамин 6Ж в этаноле – 4,0 нс [5], НИТС в этаноле – 1,4 нс [6].

Таким образом, разработан программный модуль «ФлуоТау» для анализа кинетики затухания флуоресценции. Программный модуль «ФлуоТау» позволяет аппроксимировать кинетику затухания флуоресценции моделью до 5 экспонент, имеет большую гибкость в настройке начальных и граничных условий аппроксимации.

#### Список литературы

1. O'Connor D.V.O., Ware W.R., Andre J.C. Deconvolution of fluorescence decay curves. A critical comparison of techniques // J. Phys. Chem.— 1979.— Vol. 83.— P. 1333
2. Apanasovich V. V., Novikov E. G. Methods of the decay curves analysis in fluorescent spectroscopy //J. Appl. Spectr. – 1992. – V. 56, № 4. – P. 538-549
3. Grinvald A., Steinberg I.Z. On analysis of fluorescence decay kinetics by the method of least-squares // Anal. Biochem.— 1974.— Vol. 59.— P. 583
4. Enderlein J., Erdmann R. Fast fitting of multi-exponential decay curves //Optics Communications. – 1997. – Т. 134. – №. 1-6. – С. 371-378
5. Berezin M. Y., Achilefu S. Fluorescence lifetime measurements and biological imaging //Chemical reviews. – 2010. – Т. 110. – №. 5. – С. 2641-2684.
6. Самцов М. П. и др. Концентрационное увеличение квантового выхода образования синглетного кислорода индотрикарбоцианиновым красителем //Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81. – №. 2. – С. 219-227.



УДК 535.37

Тарасов Д. С.<sup>1,2</sup>, Самцов М. П.<sup>1</sup>, Луговский А. П.<sup>1</sup>, Ощепкова Ю. И.<sup>3</sup>

## СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА С БЕЛКАМИ

<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ,  
Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Институт биоорганической химии АН РУз, Ташкент, Узбекистан

В работе представлены результаты исследования спектрально-кинетических характеристик процесса комплексообразования индотрикарбоцианиновых красителей с бычьим сывороточным альбумином.

В последние годы возрос интерес к полиметиновым красителям как перспективным фотосенсибилизаторам (ФС) для фотодинамической терапии злокачественных новообразований и иных патогенных тканей [1]. Разработки в этом направлении ведутся в НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ. На сегодняшний день выделен индотрикарбоцианиновый краситель [2], который по своим свойствам в значительной степени удовлетворяет современным требованиям к ФС. Отличительные особенности его структуры – наличие хлорзамещенного ортофениленового мостика в цепи сопряжения и двух цепочек полиэтиленгликолей (ПЭГ) с молекулярной массой 300 Да, которые ковалентно связаны с концевыми группами.

Ранее нами установлено, что индотрикарбоцианиновый ФС способен образовывать комплексы с альбумином, одним из основных эндогенных переносчиков лекарственных препаратов [3]. В работе показано, что красители с хлорзамещенным ортофениленовым мостиком в цепи сопряжения может образовывать ковалентно связанные комплексы с альбумином, в отличие от аналогичных по структуре красителей с незамещенной цепью. Для установления роли комплексообразования нового ФС с альбумином в его доставке в опухолевые ткани важно знать динамику этого процесса.

Данная работа посвящена изучению взаимодействия ФС на основе индотрикарбоцианинового красителя (ПК1), а также его структурного аналога с незамещенной цепью (ПК2), с бычьим сывороточным альбумином (БСА) во времени и в процессе титрования. Растворы БСА (Serva, Германия) готовили в натрий-калиевом фосфатном буфере Дюльбекко (0,14 моль/л) с pH=7,4 (ФСБ). Исследования проводились для группы образцов с постоянной концентрацией красителя (1,2 мкМ) и переменной концентрацией БСА (от 1,25 мкМ до 120 мкМ). Образцы готовились при температуре 20 °С, с последующей инкубацией красителя при 37 °С в течение 120 минут. Состояние красителя в растворах БСА анализировалось по спектрам поглощения и флуоресценции, измерениям квантового выхода, длительности затухания и поляризации флуоресценции. Взаимодействие красителей с БСА в процессе смешивания стоковых растворов исследовались с помощью лазерного спектрофлуориметра собственной разработки [4].

Спектральные свойства ПК1 и ПК2 в ФСБ в значительной степени определяются агрегацией в водном окружении. При концентрации красителей 1,2 мкМ также обнаруживается присутствие агрегатов, что проявляется в уширении основной полосы поглощения (рисунки 1а и 1б). С увеличением концентрации БСА для обоих красителей наблюдается смещение основной полосы поглощения в длинноволновую область, что сопровождается деформацией формы спектра, а также изменением характеристик флуоресценции красителей (таблица). По мере увеличения концентрации БСА в растворе максимум спектра флуоресценции красителя смещается в длинноволновую область, увеличиваются степень поляризации и длительность затухания его флуоресценции, возрастает относительный квантовый выход флуоресценции. Наблюдается достаточно сложный характер спектральных изменений, которые свидетельствуют о дезагрегации молекул красителя и образовании комплексов молекул красителей с БСА. В целом в зависимости от концентраций красителя и белка в растворе и их соотноше-

Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии

ния данные растворы представляют собой смесь мономеров и агрегатов красителя в водном окружении и комплексов красителя с БСА.

Таблица 1

Фотофизические характеристики красителей ПК1 и ПК2 при концентрации 1,2 мкМ в ФСБ и растворе БСА в ФСБ

Образец		$\lambda_{\text{погл}}$ , нм	$\Delta\lambda_{\text{погл}}$ , нм	$\lambda_{\text{фл}}$ , нм	$\Delta\lambda_{\text{фл}}$ , нм	$\tau$ (20 °C), нс	$\phi$ (20 °C), %	$P$ (20 °C), %
ФСБ	ПК1	709	89	739	65	0,4±0,1	3,0±0,5	23±2
	ПК2	738	63	768	51	0,4±0,1	7,0±1,0	26±2
БСА*	ПК1	732	51	747	48	1,4±0,1	22±3	46±2
	ПК2	752	51	770	49	1,3±0,1	31±3	43±2

\*Примечание. Приведены параметры для образцов при концентрации БСА 120 мкМ после инкубации при 37 °C в течение 120 минут.

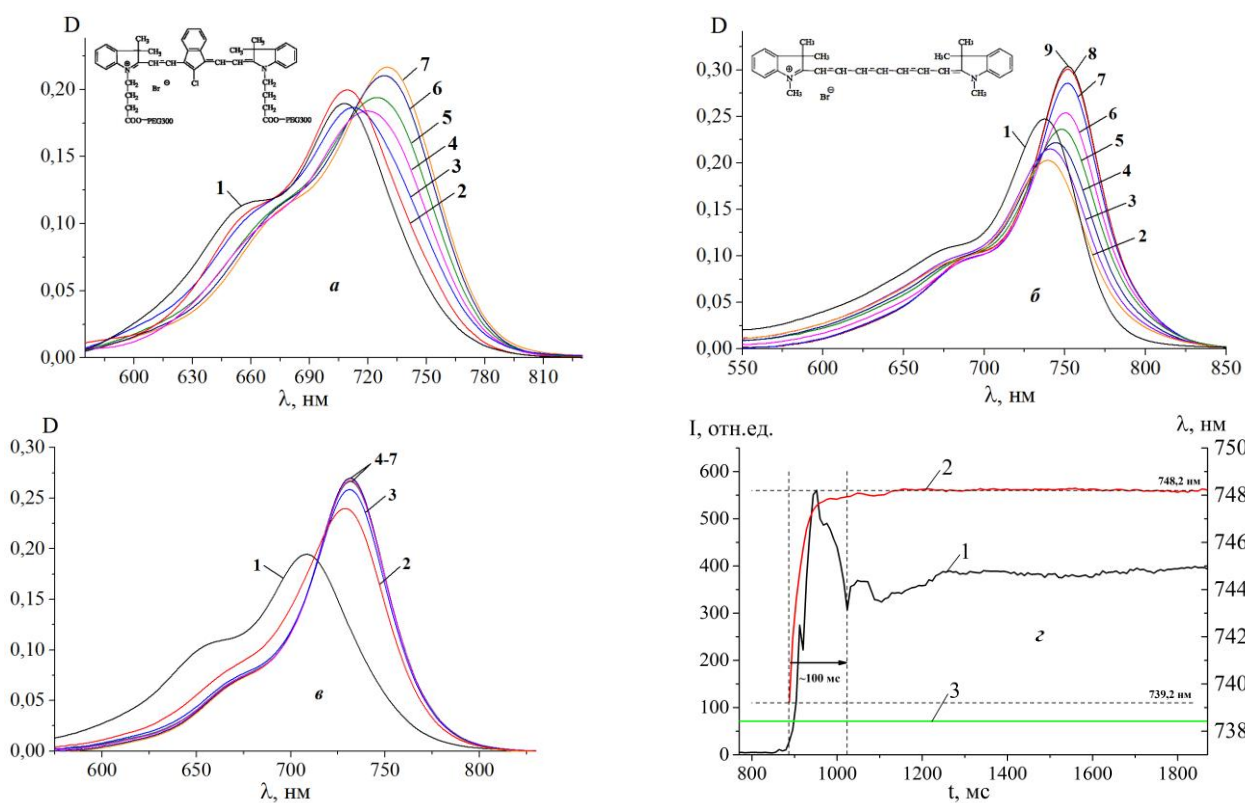


Рисунок 1 – а) Спектры поглощения ПК1 (1,2 мкМ) в растворах БСА (1 – 0 мкМ, 2 – 5 мкМ, 3 – 10 мкМ, 4 – 20 мкМ, 5 – 40 мкМ, 6 – 80 мкМ, 7 – 120 мкМ) сразу после приготовления; б) Спектры поглощения ПК2 (1,2 мкМ) в растворах БСА (1 – 0 мкМ, 2 – 1,25 мкМ, 3 – 2,5 мкМ, 4 – 5 мкМ, 5 – 10 мкМ, 6 – 20 мкМ, 7 – 60 мкМ, 8 – 80 мкМ, 9 – 120 мкМ) сразу после приготовления; в) Спектры поглощения ПК1 (1,2 мкМ) в растворах БСА (1 – 0 мкМ, 2 – 5 мкМ, 3 – 10 мкМ, 4 – 20 мкМ, 5 – 40 мкМ, 6 – 80 мкМ, 7 – 120 мкМ) после 2 часов инкубации при 37 °C; г) Кинетика изменения интенсивности (1) и положения максимума (2) флуоресценции при смешивании растворов в ФСБ красителя ПК1 (54 мкл, 100 мкМ) и БСА (546 мкл, 52,8 мкМ); интенсивность флуоресценции раствора в ФСБ красителя ПК2 при концентрации 9,0 мкМ в аналогичных условиях регистрации (3)

Для обоих красителей изменение фотофизических характеристик при введении в раствор БСА происходит крайне быстро. Так стабилизация параметров интенсивности и формы спектра флуоресценции (рисунок 1г) происходит за время не превышающее времени перемешивания растворов (~ 100 мс). Причем при комнатной температуре (20 °C) спектральные характеристики растворов обоих красителей практически стабильны во времени. За 60 минут наблюдения только для растворов красителя ПК1 отмечены небольшие изменения в спектрах поглощения и флуоресценции.

Вместе с тем при инкубации при 37 °С окрашенные красителями растворы БСА ведут себя по-разному. Спектральные и фотофизические характеристики ПК2 стабильны при инкубации в течение 2 часов наблюдения для всех исследованных концентраций БСА. Такое поведение характерно для обратимого нековалентного комплексообразования. В этом случае в растворе имеет место равновесное распределение молекул красителя, которое определяется концентрациями красителя и белка и их взаимным сродством (константой связывания). Примечательно то, что для красителя ПК2 стабилизация спектральных характеристик происходит при концентрациях БСА 60-80 мкМ.

С другой стороны, окрашенные красителем ПК1 растворы БСА не стабильны во времени (рисунок 1в): происходит монотонное смещение их спектров поглощения и флуоресценции в длинноволновую область, возрастает относительный квантовый выход флуоресценции раствора. При этом примерно через 2 часов инкубации красителя происходит стабилизация его фотофизических характеристик с концентрацией БСА в диапазоне 20-120 мкМ. По всей видимости в результате инкубации происходит увеличение доли ковалентно связанного комплекса.

С помощью подхода, который описан в работе [5], выполнено разделение на компоненты спектров поглощения красителей при различных концентрациях БСА. На основании разделения на компоненты выполнена оценка доли молекул красителей в комплексе с БСА. По данным полученных изотерм связывания выполнен расчет по методу Скэтчарда [6] константы связывания красителей с БСА в предположении эквимольной стехиометричности комплекса (на одну молекулу белка приходится только одна молекула красителя). Сразу после окрашивания красителем раствора БСА константа связывания ПК1 составляет  $3,7 \cdot 10^4 \text{ M}^{-1}$ , что  $\sim 2.8$  раза меньше чем для ПК2 –  $1,0 \cdot 10^5 \text{ M}^{-1}$ . Благодаря способности ПК1 образовывать ковалентные комплексы с БСА инкубация при физиологических условиях способствует более высокой степени связывания с БСА по сравнению с ПК2.

Таким образом, благодаря способности ковалентно связываться с БСА фотосенсибилизатор на основе индотрикарбоцианинового красителя с хлорзамещенным ортофениленовым мостиком достигает более высокой степени связывания с БСА, по сравнению со степенью связывания, которая определяется кажущейся константой связывания при не ковалентном комплексообразовании.

Результаты получены при финансовой поддержке проекта БРФФИ Ф22УЗБ-044.

#### Список литературы

1. Ishchenko A. A., Syniugina A. T. Structure and Photosensitizer Ability of Polymethine Dyes in Photodynamic Therapy: A Review // *Theoretical and Experimental Chemistry*. – 2023. – P. 1-29.
2. Lugovski A.A., Samtsov M.P., Kaplevsky K.N., Tarasau D.S., Voropay E.S., Petrov P.T., Istomin Y.P. Novel indotricarbocyanine dyes covalently bonded to polyethylene glycol for theranostics // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. – 2016. – Vol. 316. – P. 31-36.
3. Тарасов Д.С., Самцов М.П., Хлудеев И.И., Малюшкова Е.В., Семак И.В. Фотофизические свойства индотрикарбоцианиновых красителей при комплексообразовании с сывороточным альбумином // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2022. – Т. 89, № 5. – С. 605-613.
4. Самцов М. П., Радько А. Е., Каплевский К. Н., Шевченко К. А. Лазерный спектротрический комплекс для флуоресцентной диагностики области локализации опухолей // *Квантовая электроника : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 22–25 нояб. 2004 г.)* Мн.: БГУ. – 2004. – С. 20 -24.
5. Д.С. Тарасов, К.Н. Каплевский, М.П. Самцов, Е.С. Воропай Анализ спектральных свойств многокомпонентных растворов нового индотрикарбоцианинового красителя // *Вестник БГУ. Сер.1*. – 2015. – №2. – С. 9-12.
6. Варфоломеев С.Д., Гуревич К.Г. // *Биокинетика: Практический курс*. М., 1999. – 352 с.

UDC 53.087.51

Трапенюк Н. В., Колчевская И. Н., Косенко А. Д., Мозгалева С. В.,  
Пятлицкий А. Н., Дудчик Ю. И., Колчевский Н. Н.

## LOW PHOTON COUNT IMAGING

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,  
Minsk, Belarus

Under low brightness conditions the digital detector registers a small number of photons, i.e. the image contains a small number of active pixels. The paper analyzes the distribution of active and empty pixels of digital detectors under poor uniform illumination. Results of experiments on registration of uniform X-ray radiation by a digital CCD camera are presented. It is shown that registration of individual photons has a local pattern in the form of peaks varying in symmetry and size.

In the X-ray wavelength range, digital CCD cameras are used as detectors. In order to obtain a statistically reliable image, it is necessary to provide sufficient photon flux per individual pixel of the digital detector, which leads to large time and radian load on the object of study in the methods of analysis. It is proposed to consider the problem of detecting images of objects in insufficient light conditions. We will use irregularity of detector illumination as a feature of object.

Consider a digital detector of size L by H pixels under conditions of uniform illumination, with the number of photons F hitting the detector:

$$F = (LH)^x, \quad (1)$$

where x is the level of detector filling, L, H are the number of pixels in the length and height of the detector.

Consider a detector of size 2 by 2 (L=2, H=2), which detected 4 photons (x=1) at uniform illumination of the detector. Under uniform illumination, the probability of a photon hitting a pixel is equal:

$$P = \frac{1}{LH}, \quad (2)$$

Then the probability of uniformly filling the detector with photons is 9.4% (Figure 1 A). The highest probability event is 56.2% (Figure 1 B) - filling of three pixels. The probability of photons hitting two pixels is 32.8% (Figure 1 C). The probability of all photons hitting one pixel equals 1.6% (Figure 1 D).



Figure 1 – Image of the detector 2 on 2. The gray areas correspond to the pixels in which the photons hit.

The highest probability event is three pixels in which photons hit and one vacant or empty pixel. Such distribution of active and vacant pixels is typical for uniform illumination.

The probability that a single pixel of the detector will not be hit by a photon is equal:

$$k = \left(1 - \frac{1}{LH}\right)^F, \quad (3)$$

where k is the ratio of vacant pixels.

The number of vacancy pixels depends on the number of photons or on the power factor x. It follows from the dependence that when the number of photons is equal to the number of pixels, the vacancy factor does not depend on the detector size. If the number of photons is greater than the

number of pixels, then the vacancy factor increases with increasing detector size. In the limit with infinitely large detector the vacancy factor is zero:

$$\lim_{LH \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{LH}\right)^F = 0, x > 1, \quad (4)$$

if the number of photons is less than the number of pixels, the vacancy factor decreases as the detector size increases. In the limit with infinitely large detector the vacancy factor is equal to one:

$$\lim_{LH \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{LH}\right)^F = 1, x < 1 \quad (5)$$

Experiments on registration of photons of X-ray range by means of two digital cameras with resolution 480x640 and 240x320 were performed. Experimental images are shown in Figure 2. The images contain clearly visible peaks, which correspond to the X-ray photons. Numerical methods have been used to perform thresholding, highlighting the X-ray photons in the image.

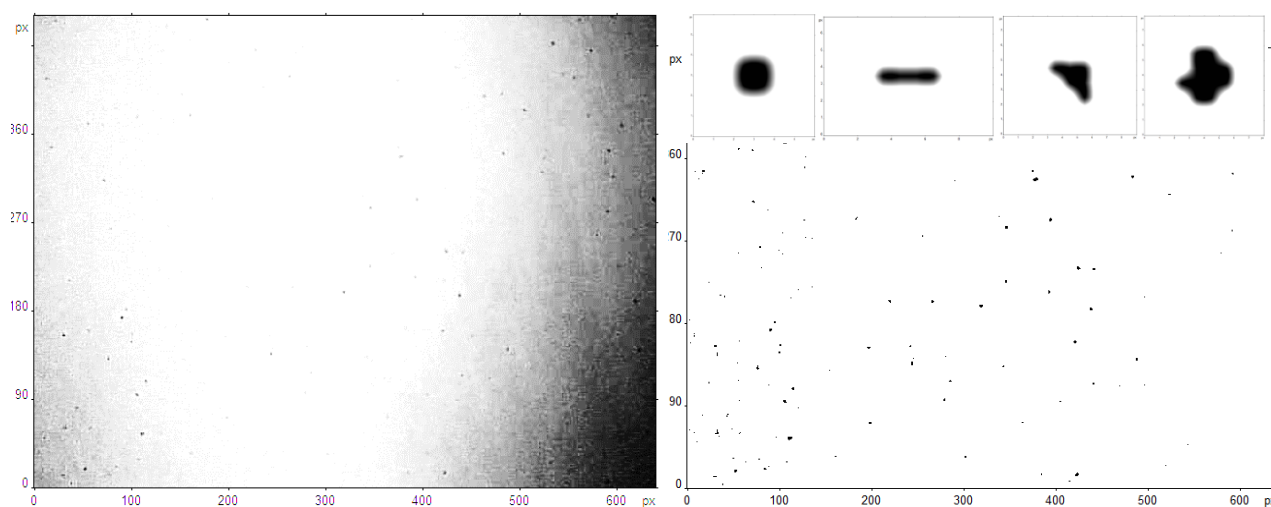


Figure 2 – Experimental image of the camera with 480x640 resolution at X-rays.

According to the results of the experiments, it is possible to register some areas (whose size is determined by the pixel size of the camera matrix and photon energy) in which the X-ray photons hit. Following a graphic processing was performed, the background obtained when the X-ray source was turned off was subtracted from the images and then a threshold processing was applied, the types of different hits in the matrix are shown in Figure 2. In the image we see several peaks with different symmetries and sizes.

The results of experiments on detection of uniform X-ray radiation by a digital CCD camera show that the registration of individual photons has a local nature in the form of peaks, differing in symmetry and size.

The work is partly supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus within the framework of task 3.07 GPNI "Mechanics, metallurgy, diagnostics in mechanical engineering", subprogram "Technical diagnostics".

#### Reference

1. MacDonald K.A. X-ray Physics, Optics, and Applications // Princeton University Press. – 2017.

УДК 53.087.51

Трапенюк Н. В., Кольчевская И. Н., Косенко А. Д., Мозгалёв С. В.,  
Петлицкий А. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.

## РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С НИЗКИМ КОНТРАСТОМ

НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

The sensitivity of optical CCD cameras to X-ray radiation of the X-ray tube was experimentally detected. It is shown that the images contain individual peaks, which correspond to individual photons of X-rays. A method of reconstruction of the image obtained under conditions of extremely low illumination is proposed. The recognition algorithm is based on the statistical analysis of the detector's active pixel distribution in comparison with the uniform pixel density distribution when the detector is uniformly illuminated.

Чувствительность обычной цифровой ПЗС-камеры к рентгеновскому излучению имеет ряд преимуществ к созданию детектора на её основе. К преимуществам относится дешевизна, простота в управлении и возможность дальнейшей модернизации. При помощи разработанного программно-аппаратного комплекса «X-ray-monitor», предназначенного для получения изображений, в заданном промежутке времени, с определённым интервалом, позволяющего использовать цифровую ПЗС - камеру для бесконтактного измерения или регистрации эксперимента, были получены снимки на камере 1 и камере 2. Для анализа снимков и фиксации изменений, запуск «X-ray-monitor» начинался до включения рентгена. Каждый снимок был получен с интервалом в 1 секунду. Итого было получено 480 кадров в формате jpeg и bmp. Из них было выбрано по несколько кадров в каждом режиме для обработки результатов (рисунок 2.3.4, 2.3.5). В ходе эксперимента было получено, что камеры чувствительны к рентгеновскому излучению.



Рисунок 1 – Фотографии ПЗС камеры при разных режимах работы источника рентгеновского излучения

При проведении эксперимента, были получены снимки, которые подтверждают чувствительность веб-камер к рентгеновскому излучению. Для полного анализа полученных снимков, произведем обработку снимков для каждого режима и камеры.

Для обработки полученных снимков использовалось программное обеспечение FemtoScan предназначенное для обработки и анализа изображений. Она позволяет производить математическую обработку данных, за счёт встроенных функций, визуализировать микрообъекты, а также используя встроенные инструменты, получать графики в 2D и 3D отображении. Трёхмерное построение графиков для снимка ПЗС камеры получено при помощи функции Build 3D View.

При обработке снимков, полученных камерами при различных режимах рентгеновской трубки, был проведён анализ полученных результатов. Для каждого режима был произведен подсчёт количества пиков и её значений.

Для получения статистически достоверного изображения необходимо обеспечить достаточный поток фотонов на отдельный пиксел цифрового детектора, что приводит к большим затратам по времени и радианной нагрузке на объект исследования. Однако, при ис-

пользовании предварительной информации об объекте можно методами статистической обработки обнаруживать изображения объектов.

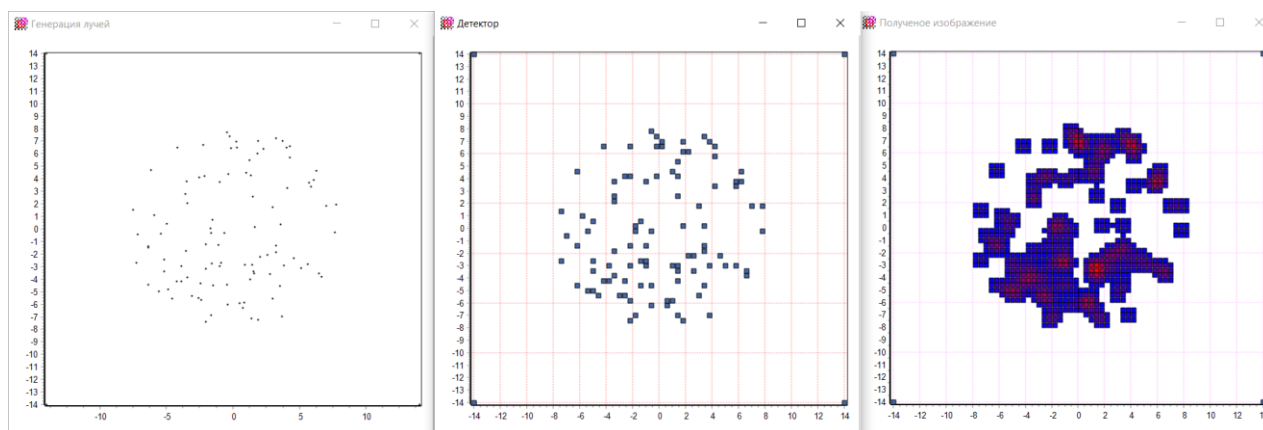


Рисунок 2 – Изображение результатов моделирования круглой диафрагмы при недостаточной освещенности.

Для решения данной задачи разработан набор программ для моделирования изображений объектов состоящих из конечного набора активных пикселей. Пример работы программы показан на рисунке 2. Показано распределение фотонов, распределение активных пикселей на детекторе и результат статистической обработки показаний детектора, позволяющий визуализировать круглую диафрагму.

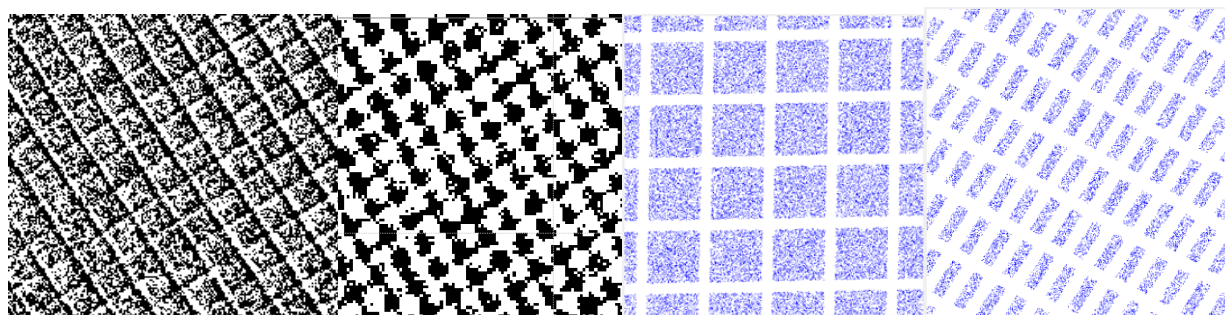


Рисунок 3 – Экспериментальные (1 и 2 слева) и расчетные (3,4 справа) изображения решеток.

Разработаны алгоритмы для моделирования и распознавания различных объектов. Алгоритм распознавания основан на анализе распределения активных пикселей детектора в сравнении с равномерным распределением плотности пикселей при равномерном засвечивании детектора. На рисунке 3 изображены результаты моделирования и результаты экспериментального исследования полимерных сеток. Качественное сходство позволяет сделать вывод о возможности регистрировать параметры изображения, например, шаг сетки, толщина, ориентация в условиях экстремально малого числа фотонов на детекторе.

Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

#### Список литературы

1. MacDonald K.A. X-ray Physics, Optics, and Applications. Princeton University Press. 2017.
2. Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С. Введение в статистическую радиофизику и оптику // М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1981. 640 с.
3. Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А.Степанов. Рентгеновская оптика: современное состояние и области применения. 2014.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАТАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ПАРАМЕТРОВ ИХ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь,

Проведены экспериментальные измерения и оценены возможности спектроскопии, основанной на регистрации спектрально-пространственных профилей локального коэффициента диффузного отражения широкополосного светового излучения живыми кровенаполненными поверхностными тканями человека. Показано, что определение гидратации тканей и параметров их микроциркуляторного русла возможно при регистрации спектрально-пространственных профилей, полученных в диапазоне спектра от 490 до 1120 нм при изменении расстояния между излучающим и приемным оптоволоконными зондами от 3 до 7 мм.

Гидратация тканей и параметры микроциркуляторного русла системы кровообращения являются важными показателями при лечении ряда сосудисто-сердечных заболеваний, которые зачастую приводят к серьезным отекам тканей [1, 2]. Наиболее удобным бесконтактным методом определения указанных параметров *in vivo* является спектроскопия диффузного отражения с пространственным разрешением [3, 4], использующая диффузионное приближение. При его применении основной проблемой оказывается правильное разделение определяемого эффективного показателя ослабления светового излучения живой кровенаполненной тканью  $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}$  на показатель приведенного (уменьшенного или редуцированного) рассеяния  $\mu'_s$  и показатель поглощения  $\mu_a$ . Обычно эту проблему решают путем усложнения используемой спектральной аппаратуры, применяя высокочастотную амплитудную модуляцию светового излучения, вводимого в ткань, или волоконные суперконтинуумные лазеры с монохроматорами [5], что позволяет учесть расстояние  $\bar{l}$ , которое в среднем при многократном рассеянии проходят фотоны в среде между точкой ввода излучения в ткань и точкой его регистрации  $\rho$  [6]. Поэтому актуально рассмотреть альтернативные решения, которые не требуют существенного усложнения используемой спектральной аппаратуры.

Как показывают численные расчеты, при регистрации спектрально-пространственных профилей локального коэффициента диффузного отражения  $R(\lambda, \rho_k)$  в достаточно широком участке спектра и учете разного характера поведения спектральных показателей  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  с длиной волны  $\lambda$  возможно разделение  $\mu_{\text{eff}}(\lambda)$  на две искомые составляющие при составлении системы нелинейных уравнений для используемого набора расстояний  $\rho_k$  и его решении путем подгонки моделируемых зависимостей  $R(\lambda, \rho_k)$  к экспериментально измеренным  $R_m(\lambda, \rho_k)$ . Если положить, что зависимость спектрального показателя описывается монотонно изменяющейся функцией вида  $\mu'_s(\lambda) = A \cdot \lambda^{-m}$ , зависящей только от двух параметров  $A$  и  $m$ , возможно составление соответствующей системы нелинейных уравнений и его численного решение, т. е. определение искомых оценок спектральных показателей  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$ .

В докладе рассмотрены особенности компьютеризированного комплекса спектральной аппаратуры, созданного авторами, и приводятся наиболее типичные спектрально-пространственные профили  $R_m(\lambda, \rho_k)$  поверхностных тканей, которые зарегистрированы в нескольких точках руки человека. Также обсуждаются зафиксированные различия формы регистрируемых профилей  $R_m(\lambda, \rho_k)$ , которые обусловлены разной морфологией подкожных тканей. Отмечается, что живые ткани отличаются сильной пространственной неоднородностью, вызываемой имеющимся распределением артериальных и венозных сосудов микроциркуляторного русла и индивидуальными особенностями показателей  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  условно обескровленной и обезвоженной ткани. Приводятся полученные оценки зависимостей  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  и обсуждаются их особенности.

Установлено, что определение объемной концентрации основных хромофоров живых



кровенаполненных тканей по получаемым оценкам спектрального показателя поглощения излучения  $\mu_a^*(\lambda)$  существенно осложняется неоднородностью ткани и неизвестностью показателя  $\mu_a^*(\lambda)$ , характерного для обескровленной и обезвоженной ткани в точке исследования тела конкретного человека. Значение этого показателя может в несколько раз превышать суммарный показатель поглощения гемоглобина крови и воды, к тому же наблюдается его существенный индивидуальный разброс.

В докладе обсуждаются методы оценки неизвестного спектрального показателя поглощения  $\mu_a^*(\lambda)$ , которые основаны на учете различий поведения спектральных зависимостей  $\mu_a^*(\lambda)$  оксигенированного HbO<sub>2</sub> и неоксигенированного Hb гемоглобина, а также воды в видимой и ближней инфракрасных областях спектра, разделении используемой области спектра на два участка и применении в них степенных полиномов с разными значениями их степени  $m_1$  и  $m_2$  для аппроксимации искомой спектральной зависимости  $\mu_a^*(\lambda)$ .

Показано, что применение описанного подхода и предлагаемой модели разделения микроциркуляторного русла системы кровообращения на два бассейна (артериальный и венозный) позволяет проводить определение объемной концентрации крови  $C_V^{bl}$  в этих бассейнах, т. е.  $C_{Va}^{bl}$  и  $C_{Vv}^{bl}$ , эквивалентных диаметров внутреннего просвета малых артериальных  $D_{va}$  и венозных  $D_{vv}$  сосудов микроциркуляторного русла и объемного содержания воды  $C_V^{H_2O}$  в исследуемом участке ткани. Отмечается сильное влияние неопределенности показателя поглощения излучения оксигенированного HbO<sub>2</sub> и неоксигенированного Hb гемоглобина на рассчитываемые значения сатурации гемоглобина венозной крови кислородом SvO<sub>2</sub>. Для снижения этого влияния и неопределенности показателя поглощения  $\mu_a^*(\lambda)$  предлагается одновременно измерять и учитывать текущие значения сатурации артериальной крови SaO<sub>2</sub>. Показано, что применение комплекса предлагаемых решений позволяет получать оценки основных параметров микроциркуляторного русла по регистрируемым спектрально-пространственным профилям диффузного отражения  $R_m(\lambda, \rho_k)$  в диапазоне спектра от 490 до 1120 нм и пределах изменения  $\rho_k$  от 3 до 7 мм.

Делается вывод о перспективности создания соответствующей спектральной компьютеризированной аппаратуры, предназначенной как для контроля эквивалентного диаметра внутреннего просвета малых артериальных сосудов при лечении гипертензии, так и состояния микроциркуляторного русла при возникновении отеков тканей, вызываемых сердечно-сосудистой недостаточностью.

#### Список литературы

1. Физиологическая оценка результатов спектрометрии содержания оксигемоглобина и реакции микрососудов на изменение гемодинамики / А.И. Кубарко, В.А. Фираго // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. – 2018. – Том 2, № 2. С. 358–363.
2. Синдромы нарушения микроциркуляции / А. В. Шотт, В.Л. Казушиц, А.П. Василевич и др. // Здоровоохранение (Минск). – 2010. – № 6. С.39–42.
3. Jacques, S. Video reflectometry to specify optical properties of tissue in vivo // Proc. SPIE 10311, Medical Optical Tomography: Functional Imaging and Monitoring. – 1993. –P. 103110D-1-103110D-16.
4. Doornbos, R. The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy / R. Doornbos, R. Lang, M. Aadlers, [et al.] // Physics in Medicine and Biology. – 1999. – Vol. 44, No 4. P. 967–981.
5. Sanchez-Cano, A. Measurement method of optical properties of ex vivo biological tissues of rats in the near-infrared range / A. Sanchez-Cano, J. Saldana-Diaz, L. Perdices, [et al.] // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, No. 13. – P. D111-D117.
6. Blaney, G. Dual-Slope Diffuse Reflectance Instrument for Calibration-Free Broadband Spectroscopy. Author manuscript / G. Blaney, R. Donaldson, S.Mushtak, [et al.] // Appl Sci (Basel). – 2021. – Vol. 11, No 4. – P. 20.

УДК 616.073.75

Турьянский А. Г.<sup>1</sup>, Чжо Зо Лин<sup>1,4</sup>, Сенков В. М.<sup>1</sup>, Зиятдинова М. З.<sup>1,2</sup>,  
Куприянов М. Ю.<sup>3</sup>, Аксенова М. М.<sup>3</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКИХ МЕТОДОМ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ К-СКАЧКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОПОГЛОЩЕНИЯ КСЕНОНА

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>4</sup>Центр Высшего Образования, Пьин У Лвин, Мьянма

Показана возможность применения метода энергодисперсионной абсорбционной спектроскопии с использованием полупроводникового рентгеновского спектрометра для диагностики легочных патологий при контрастировании ксеноном. Анализ спектра проводится в узкой спектральной полосе в области К-скачка рентгеновского фотопоглощения Хе. Метод обеспечивает возможность достоверного определения вентиляционных параметров контрастированной области легких с ультранизкой дозой нагрузки до 5-10 мкЗв.

Ксенон является одним из наиболее перспективных контрастирующих агентов в рентгенологической практике. Его применение практически не вызывает аллергических реакций, и после прекращения ингаляции он может выводиться из организма в течение нескольких минут. Сечение фотопоглощения Хе в области энергии фотонов  $E > E_K$  ( $E_K$  - энергия К-скачка фотопоглощения Хе,  $E_K = 33.6$  кэВ) более чем на 2 порядка величины выше чем у основных элементов, образующих мягкие биологические ткани [1]. Поэтому введение Хе в легкие или другие полостные зоны позволяет получать высококонтрастные изображения внутренней структуры. В настоящее время одним из наиболее информативных методов диагностики является рентгеновская компьютерная томография (КТ). При КТ-сканировании с ингаляцией ксеноном достоверно определяются размеры вентилируемых и патологических зон и степень их заполнения газом. Однако пациент обычно получает дозовую нагрузку 5-10 мЗв, что существенно превышает рекомендованные годовые пределы облучения при скрининге [2]. Это также препятствует мониторингу течения заболевания. Использование контрастирования ксеноном в стандартных проекционных методах рентгеновской диагностики, включая субтрактивную обработку изображений, не дает воспроизводимых результатов вследствие зависимости измерений от степени фильтрации первичного спектра, ускоряющего напряжения рентгеновского источника, размеров объекта и других аппаратно-зависимых факторов.

Рассмотрим возможность применения метода энергодисперсионной абсорбционной спектроскопии К-скачков рентгеновского фотопоглощения Хе для достоверного определения параметров контрастированной области с ультранизкой дозой нагрузки.

Абсорбционная рентгеновская спектроскопия К- и L-скачков фотопоглощения широко используется на синхротронных каналах для исследования энергетической структуры поверхностных слоев, состояния химической связи (область XANES) и ближнего атомного порядка конденсированных сред (область EXAFS) [3]. Область XANES обычно составляет несколько десятков эВ. В случае инертного газа при атмосферном давлении сечение фотопоглощения в области К-скачка фотопоглощения достаточно хорошо описывается приближением изолированного атома. Связанные с сечением фотопоглощения величины массового коэффициента ослабления  $\mu$  при различных энергиях фотонов  $E$  табулированы [2]. Это принципиально позволяет с помощью полупроводникового спектрометра, аппаратная функция  $A(E)$  которого заведомо больше ширины переходной области К-скачка фотопоглощения, решить обратную задачу, а именно, определить спектр пропускания в области К-скачка фотопоглощения. В рассматриваемом случае это обеспечивается путем измерения функции  $A(E)$  в области энергии К-скачка и численного решения уравнения свертки.

Полный коэффициент пропускания рентгеновских фотонов  $T_o(E)$  через объект сложного состава можно рассматривать как произведение коэффициентов пропускания через неконтрастированную область  $T_n(E)$  и контрастированную область  $T_c(E)$ , то есть  $T_o(E) = T_n(E) T_c(E)$ .

Путем подбора фильтров первичного излучения и ускоряющего напряжения рентгеновского источника формируется спектр, при котором функция  $T_n(E)$  является медленно меняющейся функцией в области К-скачка фотопоглощения Хе. Это означает, что в узкой полосе спектра по шкале энергии слева  $E_K^-$  и справа  $E_K^+$  от энергии К-скачка фотопоглощения ксенона  $E_K$  выполняется условие  $T_n(E_K^-) / T_n(E_K^+) \rightarrow 1$ . Поэтому с достаточной для экспериментальных измерений точностью можно записать

$$T_o(E_K^-) / T_o(E_K^+) = T_c(E_K^-) / T_c(E_K^+), \quad (1)$$

Таким образом, отношение коэффициентов пропускания в узкой полосе слева и справа от энергии К-скачка фотопоглощения не зависит от состава и степени ослабления в неконтрастированной области объекта и определяется скачком массового коэффициента поглощения ксенона и величиной массовой длины (размера)  $L_m$  контрастированной области. Используя табулированные величины  $\mu$  при  $E_K^-$  и  $E_K^+$  для отношения (1) получаем

$$T_o(E_K^-) / T_o(E_K^+) = \exp\{[\mu(E_K^+) - \mu(E_K^-)] L_m\}, \quad (2)$$

где  $L_m = \rho l$ ,  $\rho$  – парциальная плотность ксенона в контрастированной области,  $l$  – размер контрастированной области по ходу пучка излучения.

На рисунке 1 показана экспериментальная схема, собранная на модифицированной платформе установки Compteflex-6 (CDP Systems). В качестве источника излучения 1 использовалась трубка с медным анодом. Первичный пучок пропускаться через блок фильтрации 2, содержащий сменные пластины из  $Cu$  и  $Si$ . В качестве фантома грудной клетки 3 использовался пластиковый цилиндр длиной 200 мм, который заполнялся смесью ксенона и воздуха с различной объёмной концентрацией газов. Тканеэквивалентными объектами 4 являлись водные солевые растворы, дистиллированная вода и ребра 5 взрослой свиньи. Спектры излучения регистрировались кремниевым полупроводниковым  $SDD$  спектрометром 6 (Amptek). Для повышения эффективности регистрации фотонов входное окно спектрометра устанавливалось под углом к оси рентгеновского пучка.

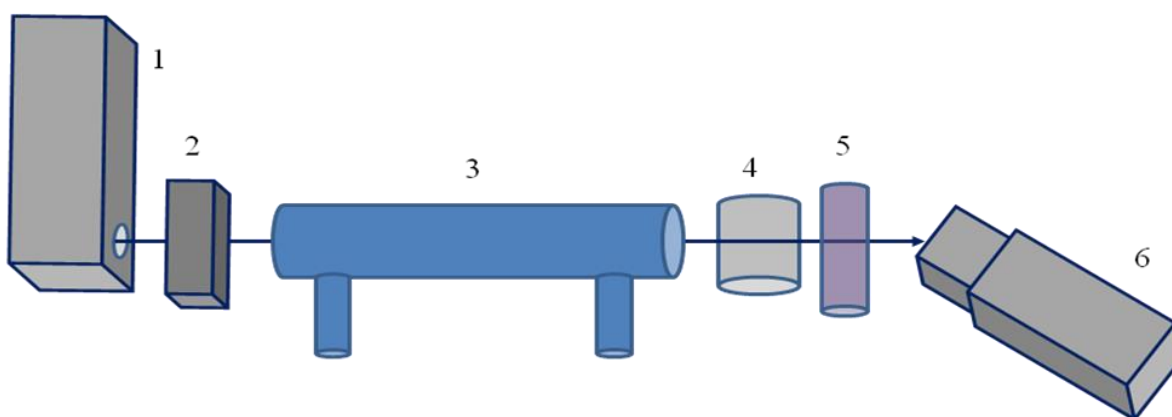


Рисунок 1 – Спектрометрическая схема с фантомом: 1 - источник полихроматического рентгеновского излучения, 2 – блок фильтрации, 3 - наполняемый газом фантом легких, 4 – тканеэквивалентная вставка, 5 – костная вставка, 6 – спектрометр.

На рисунке 2 представлены данные измерения спектра пропускания через фантом, заполненный Хе и воздухом с объёмной концентрацией 22% (кривая 1), и фантом с вставкой в виде ребра взрослой свиньи (кривая 2). Введение костной вставки приводит к снижению интенсивности спектра в области К-скачка фотопоглощения Хе на 36%. При калибровке интенсивности на указанную величину (рисунок 3) отношения интенсивностей  $S_1/S_2$  слева и справа от К-скачка фотопоглощения совпадают. Это подтверждает корректность применения выражения (2) при определении массовой длины для Хе. Аналогичные результаты были получены

при введении двух костных вставок и при введении различных эквивалентов мягких тканей. При этом расчетная поглощенная локальная доза находилась в пределах 5-50 мкРЗв, что на 2-3 порядка меньше, чем при КТ.

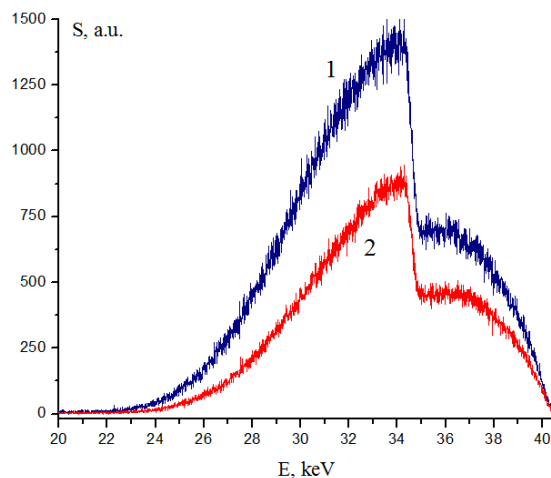


Рисунок 2 – Спектры пропускания рентгеновского пучка через фантом легких (с концентрацией ксенона 22 .%): 1 - без костной вставки, 2 - с костной вставкой

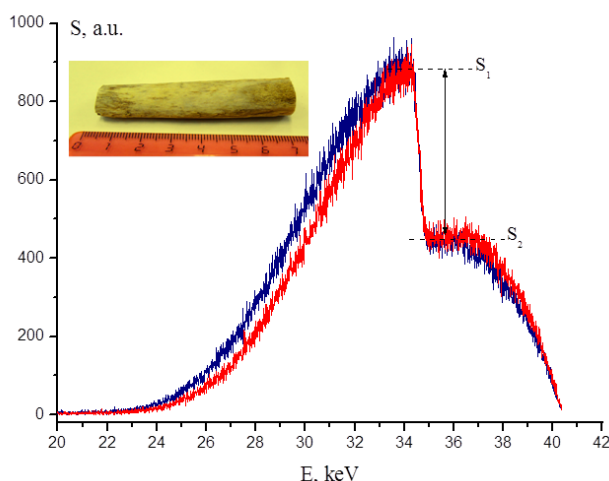


Рисунок 3 – Масштабированные по интенсивности спектры пропускания рентгеновского пучка через фантом легких (с концентрацией ксенона 22 .%): 1 - без костной вставки, 2 - с костной вставкой.

Полученные результаты на фантомах подтверждают эффективность спектрометрического метода, воспроизводимость данных и перспективность применения энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии по *K*-скачку фотопоглощения *Xe* для диагностики легочных патологий (мониторинг и скрининг). Возможны также технические применения метода, например, для исследования внутренних процессов газообмена. При этом достоверно определяются размер заполняемой газом области, концентрация и кинетические параметры газообмена. Минимальное время регистрации данных и минимальная дозовая нагрузка могут быть достигнуты при выделении или генерации спектральной полосы шириной  $\Delta E < 2$  кэВ. Применение полупроводниковых детекторов из *Ge* и *CdTe* обеспечивает эффективность регистрации квантов  $> 90\%$ .

#### Список литературы

1. Блохин М.А. Швейцер И.Г. Рентгеноспектральный справочник. М, Наука, 1982.
2. BMJ 2019; 364 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.k4931>
3. Г.В. Фетисов. Синхротронное излучение. М. Физматлит, 2007.

## РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ СЛОЯ СФОКУСИРОВАННЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Могилев, Беларусь<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

Одним из эффективных методов когерентного оптического контроля параметров слоев на подложках является волноводная спектроскопия [1]. В данном методе сочетаются туннельное возбуждение мод слоя посредством призмы связи и регистрация мощности отраженного лазерного пучка. При указанном способе возбуждения пленок зондирующее оптическое излучение проникает в них в виде волноводных мод и взаимодействует с ними на наибольшем, по сравнению с альтернативными измерительными схемами, расстоянии. Этим определяется высокая чувствительность метода волноводной спектроскопии к параметрам слоев. Однако этот метод является контактным, что приводит к трудно контролируемому искажающему влиянию на результаты измерений призмы связи. Кроме того, эффективное туннельное возбуждение мод требует протяженной (сантиметрового порядка) области оптического контакта призмы связи с исследуемой структурой. Эта особенность исключает локальные измерения характеристик слоев, востребованные, в частности, в микроэлектронике.

В докладе показано, что названные ограничения можно преодолеть, используя бесконтактный вариант волноводной спектроскопии. В нем локальное зондирование слоя осуществляется за счет возбуждения в слое мод Ценнека ТМ, либо ТЕ поляризации сфокусированным лазерным пучком [2]. Ось пучка составляет угол Брюстера с нормалью к поверхности слоя. При определенных условиях распределение интенсивности отраженного от слоя пучка имеет, как и в стандартной волноводной спектроскопии, вид  $m$ - линии. Ее контур, измеряемый матрицей фотоприемников, весьма чувствителен к локальным характеристикам слоя. Обработка контура осуществляется методом наименьших квадратов без использования опорного сигнала и без механического вращения образца. Представлены оценки эффективности предлагаемого метода на примере исследования естественного оксидного слоя на поверхности кремния.

Оптическая схема бесконтактной волноводной спектроскопии представлена на рисунке 1.

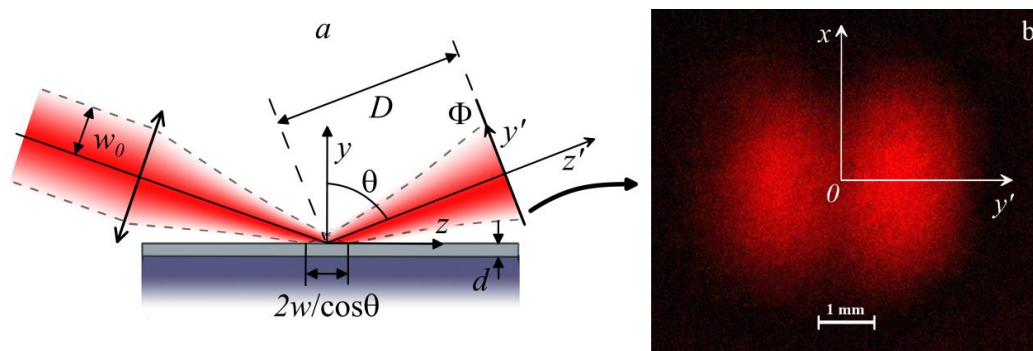


Рисунок 1 – Оптическая схема бесконтактной волноводной спектроскопии (а), фотография характерного распределения интенсивности отраженного  $m$ - линии в плоскости матрицы фотоприемников  $\Phi$  (б).

Гауссов лазерный пучок амплитудного радиуса  $w_0$ , значительно превышающего длину волны  $\lambda$ , фокусируется короткофокусным объективом на поверхность исследуемого слоя толщины  $d$ , находящегося на подложке. Радиус пучка в фокусе  $w = 2f / (k_0 w_0)$ , где  $f$  – фокусное расстояние объектива,  $k_0$  – волновое число вакуум. Ось пучка составляет угол  $\theta$  с нормалью к слою. Распределение интенсивности отраженного пучка  $S(x, y')$  регистрируется матрицей фотоприемников  $\Phi$ , расположенной на расстоянии  $D$  по оси пучка от поверхности слоя.

Для расчета функции  $S(x, y')$ , имеющей смысл компоненты вектора Пойнтинга, нормальной плоскости матрицы  $\Phi$ , использовано строгое решение векторной электродинамической задачи об отражении когерентного светового пучка от слоистой среды [3]. В нем компоненты отраженного поля записываются в виде двукратных интегралов Фурье по пространственным частотам. Проблема быстрых осцилляций подынтегральных функций решается за счет преобразования интегралов в контурные на комплексных плоскостях. В таком представлении численный расчет распределения  $S(x, y')$  не вызывает принципиальных затруднений. Кроме того, методом перевала получено аналитическое приближение для функции  $S(x, y')$ , необходимое для решения обратной оптической задачи о восстановлении параметров слоя.

На рис.2 приведены расчетные распределения интенсивности  $m$ - линий вдоль прямой, образованной пересечением плоскостей падения пучка и матрицы фотоприемников (это функции  $S_n(y') = S(0, y')/\max[S(0, y')]$ , соответствующие освещению естественного слоя оксида на поверхности кремния гауссовыми пучками гелий - неоновом лазера ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ) различных радиусов. При расчетах использованы известные дисперсионные таблицы материалов  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}$  и значение  $D = 5\text{cm}$  и угол  $\theta = 75.54^\circ$ , равный углу Брюстера.

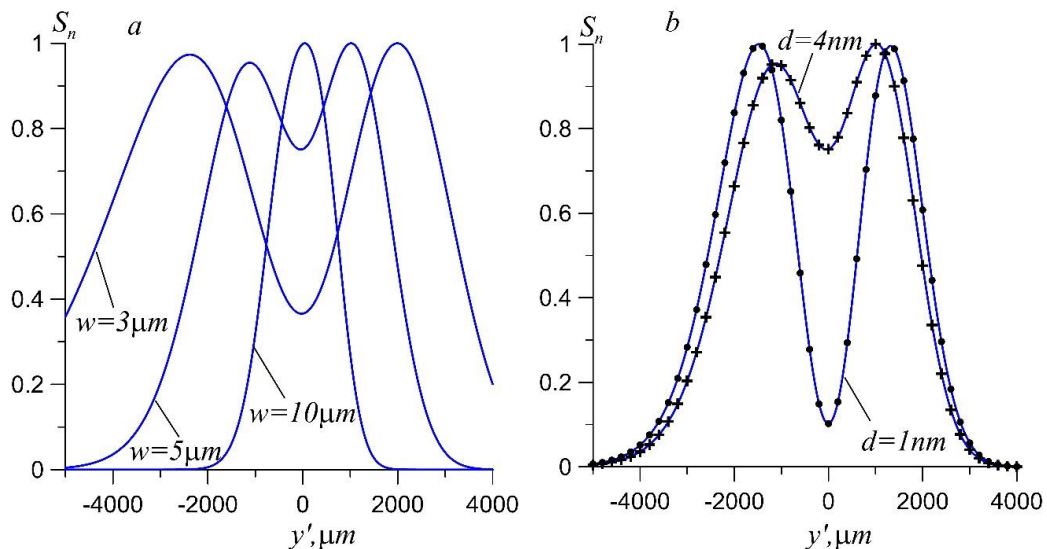


Рисунок 2 – Нормированные распределения интенсивности  $m$ - линий  $S_n(y')$ , регистрируемые матрицей фотоприемников при исследовании естественного слоя оксида толщины  $d$  на поверхности кремния:  $a - d = 4\text{nm}$  и различные радиусы зондирующего пучка  $w$ ,  $b - w = 5\text{nm}$  и различные толщины оксида  $d$ , дискретные значки – строгий расчет, сплошные кривые – метод перевала.

Согласно рис.2а, контур  $m$ - линии существенно зависит от радиуса зондирующего пучка  $w$ . По мере увеличения  $w$  контур сглаживается и теряет особенности, позволяющие судить о параметрах исследуемого слоя. Рис.2б иллюстрирует экстремально высокую чувствительность контура  $m$ - линии к толщине наноразмерного слоя.

Для определения параметров слоя по регистрируемым функциям  $S_n(y')$  можно использовать метод наименьших квадратов с целевой функцией

$$F(p_i) = \sum_{j=1}^L [S_n^{(e)}(y'_j) - p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]^2,$$

где  $i = 1, \dots, m$ ,  $m$  – число искомых параметров,  $y'_j$  – координаты в количестве  $L$ , отсчитанные вдоль  $m$ - линии,  $S_n^{(e)}(y'_j)$  – результаты измерения функции  $S_n(y'_j)$ ,  $S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)$  – теоретическая модель этой функции. Далее предполагается, что  $m = 4$ , причем  $p_2 = d, p_3 = n, p_4 = k$  ( $n$  и  $k$  – показатель преломления и поглощения слоя),  $p_1$  – нормировочная постоянная; показатели преломления и поглощения подложки предполагаются известными.

Погрешности решения обратной оптической задачи  $\delta p_i$  допускают оценки [4]

$$|\delta p_i| \leq \max_j |\delta S_n^{(e)}(y'_j)| E_i, \quad E_i = \sum_{j=1}^L \left| \sum_{k=1}^m M_{ik}^{-1} \frac{\partial [p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]}{\partial p_k} \right|,$$

где  $\delta S_n^{(e)}(y'_j)$  - погрешности измерения значений  $S_n^{(e)}(y'_j)$ ,  $M_{ik}^{-1}$  – матрица, обратная матрице

$$M_{ik} = - \sum_{j=1}^L \frac{\partial [p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]}{\partial p_i} \frac{\partial [p_1 S_n(p_2, p_3, p_4, y'_j)]}{\partial p_k}.$$

Минимизации коэффициентов ошибок  $E_i$  достижима за счет выбора условий измерений [4]. Рис.3 иллюстрирует влияние на коэффициент ошибки определения толщины слоя  $E_2$  параметров зондирующего пучка  $w$ ,  $\theta$ , а также ширины диапазона  $\Delta y'$  сканирования  $y'$ . При  $w = 5.01 \mu m$ ,  $\Delta y' = 3878 \mu m$ ,  $\theta = 75.54^\circ$  имеем минимальное значение  $E_2 = 0.0091 \mu m$ . В этом случае при достижимом экспериментально  $\max_j |\delta S_n^{(e)}(y'_j)| = 0.0005$  ошибка измерения толщины слоя  $|\delta p_i| < 0.05 nm$ . Для сравнения, в классической схеме, основанной на регистрации угловой зависимости энергетического коэффициента отражения параллельного пучка минимальное значение  $E_2$  для рассматриваемой структуры составляет  $1.63 \mu m$ .

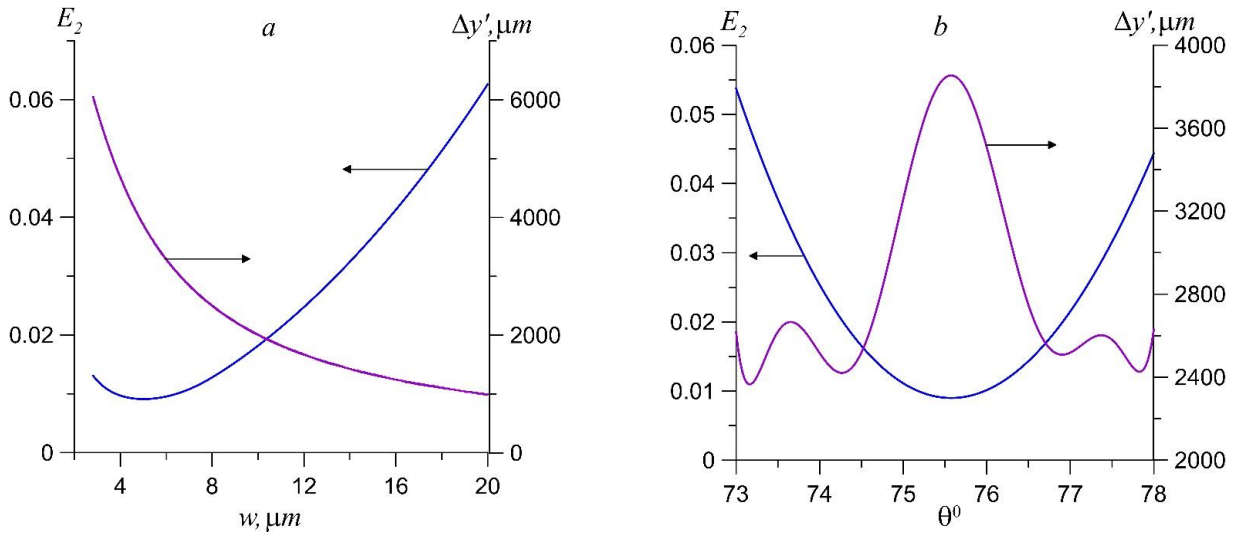


Рисунок 3 – Влияние выбора параметров возбуждающего пучка на коэффициент ошибки восстановления толщины окисного слоя на поверхности кремния.

Представленные в настоящей работе соображения подтверждены нами экспериментальными исследованиями оксидных слоев на поверхности кремниевых пластин.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

#### Список литературы

1. Khomchenko, A.V. Waveguide spectroscopy of thin films. - New York: Acad. Press, 2005. - 220 p.
2. Сотский А.Б., Назаров М.М., Михеев С.С., Сотская Л.И. Чувствительность отражательных терагерцовых сенсоров водных растворов // Журнал Технической Физики. – 2021, том 91, вып.2. С.315 – 325.
3. Сотский, А.Б. Теория оптических волноводных элементов. - Могилев: УО «Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова», 2011. – 456 с.
4. Сотский А.Б., Штейнгарт Л. М., Парашков С. О., Сотская Л. И. О выборе диапазонов измерения отражательной способности призмы связи при волноводной спектроскопии тонких пленок // Известия РАН. Серия физическая. – 2016. – Т. 80, № 4. – С. 465–469.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНОРАЗМЕРНОЙ АЛМАЗНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Рассмотрены технологические аспекты наноразмерной алмазной лезвийной обработки поверхности на основе цветных металлов и сплавов для получения поверхностей высшего класса чистоты при изготовлении металлооптических изделий оптоэлектронного назначения.

Наноразмерная алмазная лезвийная обработка поверхности цветных металлов и сплавов в настоящее время широко используется для выпуска широкой номенклатуры металлооптических изделий оптоэлектронного назначения: зеркал для супермощных лазеров, отражателей, модуляторов, растров и др. [1]. Главное достоинство метода — это получение поверхностей высшего класса чистоты с минимальным значением физической, химической и индуцированной неоднородности. По нашим оценкам на сегодняшний день предельные значения шероховатости, которые можно достигнуть этим методом составляют порядка 1 нм.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЗЦА	СТРУКТУРА МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЯ	ОБОРУДОВАНИЕ И РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ	ПРОЧИЕ УСЛОВИЯ
радиус закругления режущей кромки - $\rho$ ; передний угол - $\gamma$ ; задний угол - $\alpha$ ; ширина фасетки - $\beta$ ; радиус режущей кромки - $\rho$	неоднородности структуры и электрофизическое состояние поверхности; инородные включения; внутренние напряжения; деформации от изменения температуры	частота вращения шпинделя; осевое и радиальное биения шпинделя; дискретность перемещения продольного суппорта; скорость перемещения поперечного суппорта; биения приводов исполнительных органов; устройство охлаждения.	температура помещения; виброизоляция станка; состояние воздушной среды (влажность, пыльность); давление и расход сжатого воздуха подаваемого в станок; устройство удаления стружки; неточность форм базовых поверхностей (планшайбы) и приспособлений; крепления изделий; вибрации станка.

Рисунок 1. – Основные факторы, влияющие на параметры поверхности, обработанной по технологии алмазного наноточения

В развитии технологии и повышения эффективности наноразмерной алмазной обработки сложной технической задачей является создание специального оборудования, позволяющего реализовать возможности метода алмазного точения с нанометровой точностью и инженерного обеспечения по вибро- и шумоизоляции, стабилизации температуры, очистки технологических жидкостей и воздуха. Основные технические параметры оборудования для алмазного точения: точность позиционирования суппорта, радиальное и осевое биение



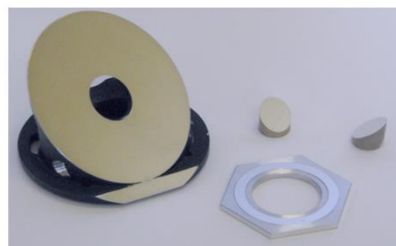
## Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии

шпинделя, погрешность линейного перемещения суппорта, параметры алмазного резца, система охлаждения, технологическая оснастка крепления деталей в совокупности с технологией обработки должны обеспечивать высокое качество обработки по 14 классу с оптической чистотой поверхности с шероховатостью не хуже  $Ra \leq 5$  нм. Погрешности перемещения исполнительных органов должны быть на уровне 0,1... 1,0 мкм. Нами сформулированы и исследованы основные факторы, влияющие на параметры поверхности, обработанной по технологии алмазного наноточения (рисунок 1).

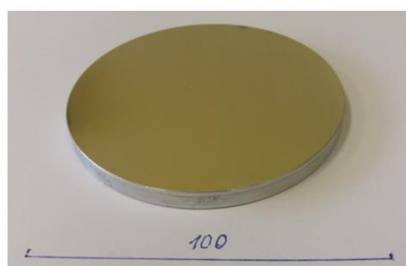
Как показывают исследования доминирующее влияние на чистоту обработки поверхности оказывает форма и качество заточки резца. Поэтому перед проведением операции по суперфинишной обработке подложек для получения оптимальных значений параметров  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $Ra$ ,  $P$  (плоскостность, шероховатость, класс чистоты, лучевая прочность) необходимо проводить обязательный контроль формы и качества заточки резца. Для более детального анализа режущей кромки резца можно использовать растровый электронный микроскоп типа РЭМ Leo 1455 с увеличением 20000х. Несмотря на высокое качество заточки режущей кромки ( $\leq 40$  нм), остается проблема выбора рабочей точки на радиусной кромке резца. Скорость резания при алмазном точении должна быть выбрана такой, при которой обеспечиваются достаточная производительность при минимальной вибрации системы. При этом скорость вращения шпинделя может достигать 1500 об/мин. Влияние скорости подачи на чистоту поверхности устанавливается опытным путем и зависит, в основном, от радиуса кромки резца и физических характеристик обрабатываемого материала. Для каждого резца в зависимости от величины радиуса кромки подбирается скорость подачи.



Зеркала из Al-сплава и для внутреннего и внешнего обзора



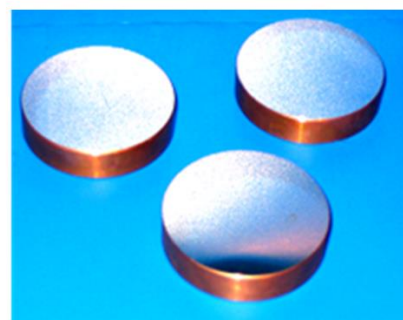
Угловые отражатели, растры из Al- сплава



Зеркала из Al-сплава с высокой лучевой прочностью



Медные теплоотводы для изделий оптоэлектронной техники



Лазерные зеркала из меди

Рисунок 2 – Общий вид освоенной научно-технической продукции

Проведены исследования влияния параметров алмазного резца на шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что для обеспечения шероховатости обработанной поверхности в пределах 0,005...0,010 мкм необходимо, чтобы профильная часть режущего лезвия удовлетворяла следующим требованиям: радиус закругления лезвия  $\leq 0,04$  мкм; радиус при вершине 8...10 мм. Лучшая чистота поверхности получена при скорости подачи 0,14 мм/сек и средней скорости вращения шпинделя 1200 об/мин, при этом глубина врезания резца не превышала 5 мкм. Отклонение режимов обработки от оптимальных  $\pm 10\%$  является допустимым.

Технологический процесс изготовления прецизионных оптических поверхностей на основе алюминиевых сплавов включает следующие основные технологические операции:

1) изготовление подложек из особо чистых сплавов алюминия с 2.6% содержанием магния марки АМг-2, АМг-6 с использованием токарно-фрезерного оборудования; 2) термическая обработка для стабилизации фазового и структурного состояния материала; 3) размерная предварительная обработка поверхности подложки твердосплавным резцом и стабилизирующий отжиг; 4) прецизионное точение поверхности алмазным резцом с припуском 0,05...0,1 мм и стабилизирующее старение; 5) суперфинишное прецизионное точение алмазным резцом с оптической чистотой поверхности; 6) визуальный и оптический контроль шероховатости, плоскостности, чистоты поверхности; 7) контроль электрофизического состояния поверхности по измерению работы выхода электронов.

В настоящее время в НИИПФП им. А.Н.Севченко создан экспериментальный участок алмазного наноточения цветных металлов и сплавов, который используется для выпуска широкой номенклатуры металлооптических изделий.

Основные технические характеристики:

Допустимые размеры деталей – диаметр  $\leq 250$  мм, толщина (0,2 - 40) мм  
Шероховатость обработанной поверхности  $Ra = (2-4)$  нм  
Плоскостность обработанной поверхности на  $\varnothing 100$  мм  $N = 3, \Delta N = 0,25$

Полученные результаты позволяют сформулировать подходы к повышению эффективности наноразмерной алмазной лезвийной обработки цветных металлов и сплавов и нашли отражение в технологии изготовления металлооптических изделий.

Общий вид освоенной научно-технической продукции приведен на рисунке 2.

#### Список литературы

1. Шаронов, Г.В. Технология наноразмерной алмазной лезвийной обработки поверхности подложек из алюминиевого сплава и методы контроля ее электрофизического состояния / Г.В. Шаронов, А.Л. Жарин, А.К. Тявловский // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т.1 / под ред. чл-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – С. 153-161 .

УДК 621.3.084.866

Шаронов Г. В.<sup>1</sup>, Гасенкова И. В.<sup>2</sup>, Гусаков Г. А.<sup>1</sup>, Мухуров Н. И.<sup>2</sup>.

## **ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И АНТИСТОКСОВЫХ ЛЮМИНОФОРОВ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

Разработана технология изготовления люминесцентных экранов ИК-лазерного излучения на основе антистоксовых люминофоров и пористого анодного оксида алюминия, изготовлены и проведены испытания экспериментальных образцов.

Для визуальной регистрации полей ИК лазерного излучения успешно применяются антистоксовые люминофоры на основе редкоземельных элементов [1,2]. В частности, наиболее эффективными люминофорами со свечением в зеленой и красной областях спектра являются оксихлориды гадолиния, активированные иттербием и эрбием [3]. Несмотря на широкое использование в настоящее время этих люминофоров, актуальной остается задача повышения чувствительности при визуализации слабых потоков ИК лазерного излучения, а также повышение лучевой прочности при визуализации мощных потоков лазерного излучения. Одним из путей повышения их чувствительности является увеличение квантового выхода свечения, поэтому особую значимость имеет физико-химический аспект исследований и прежде всего изучение свойств антистоксовой люминесценции во взаимосвязи с фазовым и микро- и наноразмерным составом получающихся при синтезе поликристаллических порошков. Это обусловлено тем, что редкоземельные активаторы входят в любую из фазовых компонент и их концентрация может оказаться значительно меньше оптимальной.

Целью настоящей работы является разработка технологии изготовления люминесцентных экранов на основе антистоксовых люминофоров (АЛ) и пористого анодного оксида алюминия (ПАОА).

Пористые анодные оксидные покрытия как диэлектрический материал с уникальной ячеисто-пористой структурой привлекает большое внимание в связи с применением в нано-и микросистемной техники [4,5]. Этот материал, получаемый анодным окислением алюминия в электролите, обладает высокими механическими и диэлектрическими свойствами. Наличие пористой структуры из перпендикулярно расположенных цилиндрических пор делает этот материал перспективным для внедрения в него веществ, обладающих собственными люминесцентными свойствами, например антистоксовых люминофоров и органических красителей [6].

Для изготовления экспериментальных образцов (ЭО) люминесцентных экранов используются подложки из алюминиевого сплава АМг-2 диаметром 100,0 мм и толщиной 1,0 мм. Суперфинишная обработка подложек проводилась на специальном токарном станке со шпинделем на воздушном подшипнике методом алмазного торцевого точения. Поверхность подложки после такой обработки имеет высокую отражательную способность и степень чистоты не ниже 14 класса [7,8]. Анодное окисление подложек проводится в двухэлектродной электрохимической ячейке с использованием источника постоянного тока. Электролит 0,3 М H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, напряжение анодирования, 25 В.

Процесс анодирования проводится до получения толщины оксида порядка 40 мкм. Общий вид подложек приведен на рисунке 1а, а изображение рельефа поверхности на рисунке 1б.

Измерения диаметров пор и толщины покрытия анодного оксида алюминия проводятся по результатам полученных снимков изображений поверхности (рис. 2а) и скола (рис. 2б) на сканирующем электронном растровом микроскопе типа JSM-6380L.

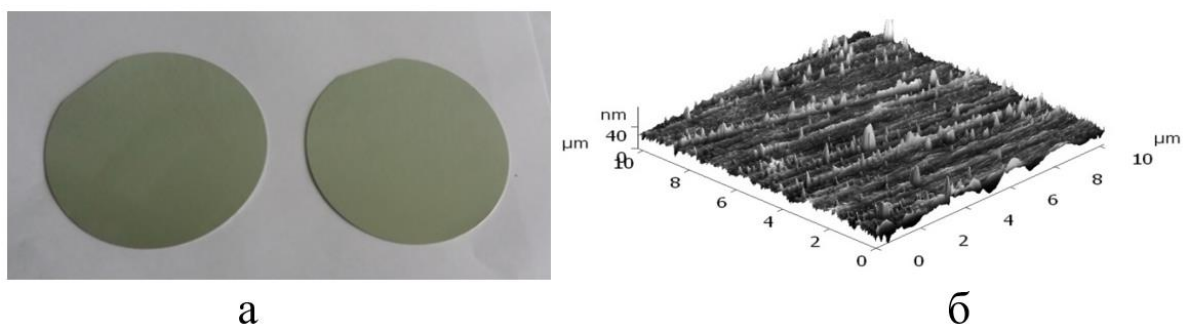


Рисунок 1 - Общий вид изготовленных подложек ПАОА(а) и изображение рельефа поверхности, полученное на ACM Solver P47 PRO с  $Ra = 81,8$  нм.

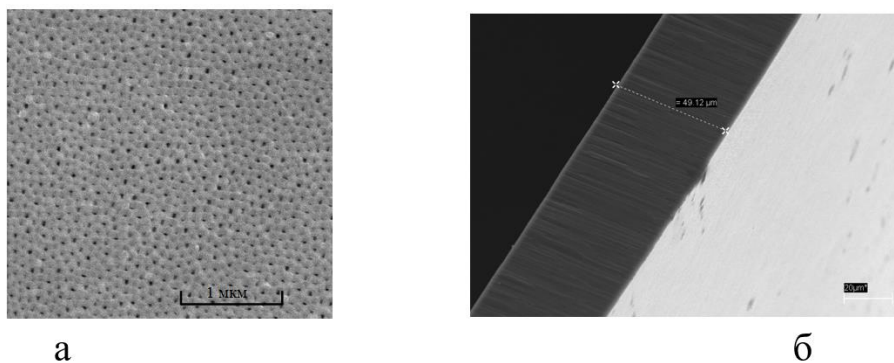


Рисунок 2. Изображение пористой структуры поверхности ПАОА(а) и скола покрытия(б). Усреднённые значения: размеров пор - 50 нм, расстояний между центрами пор - 100 нм, толщина покрытия - 49 мкм

На поверхность оксида алюминия наносится состав антистоксового люминофора на основе поликристаллического оксихлорида гадолиния, активируемого ионами иттербия и эрбия, в виде мелкозернистого порошка с нано- и микрочастицами, таким образом, что частицы люминофора глубоко проникают в поры слоя АОА, частично или полностью закупоривая их. Повышение лучевой прочности визуализатора обеспечивается за счет более высокой теплопроводности подложки из сплава алюминия, рассеивающей избыточное тепло при воздействии лазерного инфракрасного излучения, при этом принципиальных ограничений по площади регистрируемых полей не имеется.

С учетом полученных результатов разработана технология, изготовлены и проведены испытания экспериментальных образцов люминесцентных экранов для визуализации инфракрасного лазерного излучения в спектральном диапазоне (0,8 – 1,6) мкм со светимостью в области 0,64 - 0,66 мкВт/см<sup>2</sup> и интегральной чувствительностью  $\leq 0,01$  Вт/см<sup>2</sup>. Общий вид люминесцентных экранов на подложке из сплава алюминия с ПАОА толщиной 1,0 мм, выполненный в виде диафрагм  $\varnothing 1,0$  мм и  $\varnothing 3,0$  мм приведен на рисунке 3. Толщина люминесцентного слоя  $(0,4 \pm 0,2)$  мм.

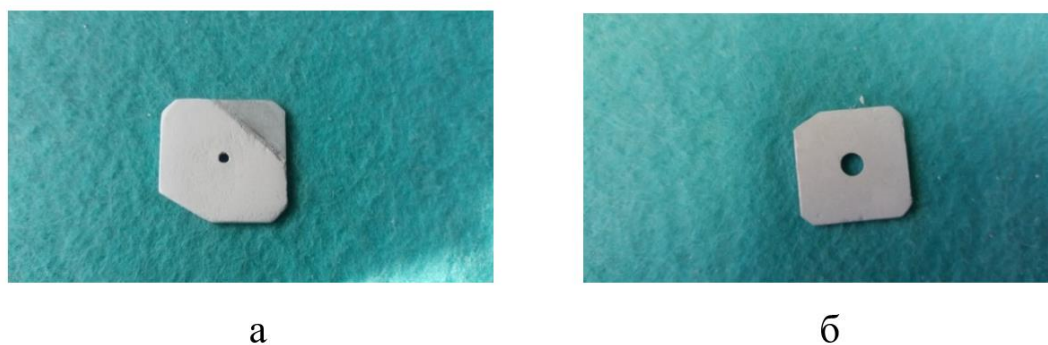


Рисунок 3 – Люминесцентные экраны-диафрагмы ИК лазерного излучения в спектральной области (0,8 – 1,6) мкм, габаритные размеры (20x20x20) мм.

Проведены исследования оптических характеристик разработанных люминесцентных экранов. Полученные спектры люминесценции планарных наноструктур на основе ПАОА и оксихлоридов редких земель имеют характерные максимумы люминесценции в спектральной области  $\lambda = 660-672$  нм, обусловленные присутствием в порах микро-и наночастиц с ионами иттербия и эрбия. Как показали проведенные исследования, использование ПАОА и компонентов редких земель открывает новые возможности разработки и формирования новых оптических устройств для преобразования инфракрасного лазерного излучения в видимое на твердых подложках, обладающих высокой лучевой и механической прочностью.

Такая конструкция люминесцентных экранов с использованием ПАОА позволяет:

- повысить лучевую прочность люминесцентных экранов при достаточно широких площадях для регистрации мощных потоков инфракрасного лазерного излучения импульсных, непрерывных и квазинепрерывных лазеров, включая волоконные лазеры;
- обеспечить высокую точность наведения ИК-излучения на обрабатываемую поверхность с контролируемой конфигурацией и распределением интенсивности по сечению пучка;
- повысить производительность и структурное совершенство обрабатываемой рабочей поверхности.

Разработанные в рамках настоящей работы люминесцентные экраны на основе пористого анодного оксида алюминия нашли практическое применение в технологических комплексах лазерного термического упрочнения поверхностей деталей из железоуглеродистых сплавов.

Экраны эффективно также могут быть использованы для юстировки, настройки лазеров и сложных лазерных систем в спектральной области (0,8 – 1,6) мкм.

#### Список литературы

1. Тимофеев, Ю.П. Люминесцентные приемники прямого видения полей ИК-излучения. / Тимофеев, Ю.П., Фридман, С.А.//Изв. АН СССР. Сер. физ., 1981, - т.45, № 2, – С. 296-301
2. Лазерные визуализаторы/ [www.bsuproduct.bu](http://www.bsuproduct.bu)
3. Г.В.Шаронов. Визуализатор инфракрасного лазерного излучения. Патент на полезную модель № 11035 от 30.04.2016.
4. Денесюк, С.В. Двухзонные газовые сенсоры на подложках  $Al_2O_3$  с тонкопленочными чувствительными элементами из оксида железа. / С.В. Денесюк, Н.И. Мухуров Н.И., О.Н.Куданович.// Нано- и микросистемная техника, 2018. – №11. – С. 676 – 688.
5. Gasenkova, I. Porous anodic alumina for some photonic devices. / I.Gasenkova, N. Mukhurov, S. Zhvavyi // Determinations Nanomed Nanotechnol. - 2020. - Vol.2, Issue 1. - P. 1
6. Мухуров Н.И., Гасенкова И.В., Казак Н.С., Шаронов Г.В. Визуализатор инфракрасного лазерного излучения. Патент на полезную модель. № 11143 от 18.03.2016
7. Шаронов, Г.В. Технология наноразмерной алмазной лезвийной обработки поверхности подложек из алюминиевого сплава и методы контроля ее электрофизического состояния / Г.В. Шаронов, А.Л. Жарин, А.К. Тявловский // Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т.1 / под ред. чл-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – С. 153-161 .
8. Гусаков, Г.А. Повышение качества поверхности металлических зеркал-отражателей при наноразмерной алмазной лезвийной обработке / Г.А.Гусаков, Г.В.Шаронов // Приборы и методы измерений. – 2021, т. 12, № 2, - С. 30-37

## ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ КОНТРОЛЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Оценены возможности спектроскопии, основанной на регистрации спектрально-пространственных профилей локального коэффициента диффузного отражения широкополосного светового излучения пищевыми продуктами. Анализ результатов обработки экспериментально измеренных профилей диффузного отражения мелкодисперсных пищевых продуктов показывает возможность определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения светового излучения, что позволяет при дальнейшей обработке определять объемную концентрацию основных хромофоров, имеющих полосы поглощения в используемом диапазоне спектра.

Спектральный контроль пищевых продуктов широко используется для определения и анализа химического состава продукта, включая содержание жирных кислот, белков, углеводов и других хромофоров. Это помогает обеспечить соответствие продуктов стандартам качества, защитить потребителей от подделок и мошенничества, а также повысить эффективность производства и снизить затраты на контроль качества.

Достаточно новое направление оптического контроля неоднородных сильнорассеивающих сред – спектроскопия обратного диффузного отражения светового излучения с пространственным разрешением, основанная на использовании диффузионного приближения теории переноса излучения при многократном характере рассеяния фотонов. Это приближение при выполнении несложных условий: 1) значение показателя приведенного рассеяния  $\mu'_s$  существенно превышает значение показателя поглощения  $\mu_a$  излучения, 2) произведение  $\mu_{\text{eff}} \cdot \rho \geq 1$ , где  $\mu_{\text{eff}} = \sqrt{3\mu_a(\mu_a + \mu'_s)}$ , а  $\rho$  – расстояние между точкой ввода излучения в рассеивающую среду и точкой регистрации диффузно отраженного излучения, можно применять для описания локального коэффициента диффузного отражения среды  $R(\lambda)$  [1]. Регистрируя спектрально-пространственные профили  $R_m(\lambda, \rho_k)$  диффузного отражения при разных расстояниях  $\rho_k$  между неподвижным освещающим и подвижным приемным оптоволоконными зондами в широком участке спектра можно определять спектральные показатели  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  исследуемой рассеивающей среды. При проведении их дальнейшего анализа появляется возможность оценки отклонения состава контролируемой среды от заданного или эталонного.

В докладе приводится конструкция созданного компьютеризированного комплекса на основе спектрометра AvaSpec 2048BL фирмы Avantes (Голландия) и оптоволоконной техники, а также методика регистрации и нормировки спектрально-пространственных профилей  $R_m(\lambda, \rho_k)$  диффузного отражения, которая позволяет снизить влияние долговременной нестабильности спектральных характеристик используемой аппаратуры.

При исследовании оптических свойств мелкодисперсных сред обычно используют предположение об их пространственной однородности, т. е. считают, что их спектральные показатели  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  не зависят от координат  $x, y$  и глубины  $z$  проникновения излучения в них. На самом деле проведенные нами экспериментальные измерения  $R_m(\lambda, \rho_k)$  показывают наличие заметной неоднородности композиционных материалов, вызываемой недостаточно однородном перемешивании компонент при изготовлении. Поэтому в проведенных экспериментальных исследованиях зависимости  $\mu'_s(\lambda)$  и  $\mu_a(\lambda)$  ряда пищевых продуктов нами использовался симметричный набор расстояний  $\rho_k$  между неподвижным излучающим зондом и подвижным приемным. Из них 5 положений  $\rho_k$  соответствовали смещению приемного зонда влево от излучающего зонда, а оставшиеся 5 – вправо. Такая схема

геометрии проводимых измерений позволяет сразу выявлять неоднородность измеряемых профилей  $R_m(\lambda, \rho_k)$  и правильно выбирать исследуемый участок поверхности среды, в котором  $R_m(\lambda, \rho_k)$  имеет примерно симметричные зависимости слева и справа от точки ввода светового излучения в среду. Это позволяет составить систему нелинейных уравнений, т. е сформировать функцию невязки в виде суммы 10-ти разностей между измеренными  $R_m(\lambda, \rho_k)$  и смоделированными с помощью диффузионного приближения  $R[\lambda, \rho_k, \mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda)]$  зависимостями

$$f_{res}(\lambda_i) = \sum_{k=1}^{10} \left[ R_m(\lambda, \rho_k) - R(\lambda, \rho_k, \mu'^*_s(\lambda_i), \mu^*_a(\lambda_i)) \right]^2 \quad (1)$$

или суммы 10-ти отношений

$$f_{res}(\lambda_i) = \sum_{k=1}^{10} \left[ \frac{R(\lambda, \rho_k, \mu'^*_s(\lambda_i), \mu^*_a(\lambda_i))}{R_m(\lambda, \rho_k)} - 1 \right]^2, \quad (2)$$

минимизируя которые при варьировании формы  $\mu'^*_s(\lambda)$ , можно определять искомые зависимости  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  [2]. Поскольку спектрально-пространственные профили  $R_m(\lambda, \rho_k)$  диффузного отражения регистрируются в большом диапазоне значений (при изменении на 3-4 порядка) в наших исследованиях применялась функция невязки в виде (2), чтобы обеспечить одинаковый вклад в невязку как слабых, так и мощных составляющих  $R_m(\lambda, \rho_k)$ , регистрируемых при разных значениях  $\rho_k$ .

В докладе приводятся зарегистрированные спектрально-пространственные профили  $R_m(\lambda, \rho_k)$  ряда мелкодисперсных пищевых продуктов. Обсуждаются причины возникновения отклонения зависимостей  $R[\lambda, \rho_k, \mu'^*_s(\lambda), \mu^*_a(\lambda)]$ , моделируемых с помощью диффузионного приближения, от измеряемых профилей  $R_m(\lambda, \rho_k)$ . Представлены спектральные зависимости  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$ , получаемые в результате подгонки с использованием выражения (2), для нескольких типов мелкодисперсных пищевых продуктов. Показано, что в полученных зависимостях  $\mu^*_a(\lambda)$  для яблок, наблюдаются 3 мощные полосы поглощения, обусловленные наличием в яблоке жидкой воды  $H_2O$  и клеток с хлорофиллом двух типов  $a$  и  $b$  [3]. Причем, получаемые зависимости  $\mu^*_a(\lambda)$  имеют размерность  $см^{-1}$ , что позволяет далее определять объемную концентрация хлорофиллов, воды и других хромофоров.

Таким образом, проведенные исследования указывают на перспективность создания малогабаритной спектральной аппаратуры диффузного отражения нового поколения, основанной на регистрации спектрально-пространственных профилей  $R_m(\lambda, \rho_k)$  и методики их обработки на основе диффузионного приближения. Это позволяет определять спектральные зависимости показателей  $\mu'^*_s(\lambda)$  и  $\mu^*_a(\lambda)$  мелкодисперсных пищевых продуктов, которые далее можно использовать для оперативного определения объемной концентрации в них основных хромофоров, а также их органолептических свойств, что важно при оценки их деградации при длительном хранении и установлении предельных сроков годности.

#### Список литературы

1. Farrell, T. J. A diffusion theory model of spatially resolved, steady-state diffuse reflectance for the noninvasive determination of tissue optical properties in vivo / T. J. Farrell, M. S. Patterson, B. C. Wilson // *Medical Physics*. – 1992. Vol. 19. – P. 881–888.
2. Фираго В.А., Шулико К.И. Способ определения спектральных показателей приведенного рассеяния и поглощения излучения мелкодисперсными материалами и устройство для его осуществления. Положительное решение о выдаче евразийского патента по евразийской заявке № 202292115 на изобретение от 30 июня 2022 г., принятое 15.03.2023 г
3. Milne, B. Unraveling the Intrinsic Color of Chlorophyll / F. Bruce Milne, Y. Toker, A. Rubio [et al.] // *Angewandte Chemie International Edition*. 2015. – Vol. 54, No 7. – P. 2198–2201.

УДК 621.923.75:535.21

Юдин Н. Н.<sup>1,2</sup>, Худолей А. Л.<sup>3</sup>, Зиновьев М. М.<sup>1,2</sup>, Подзывалов С. Н.<sup>1</sup>, Слюнько Е. С.<sup>1</sup>,  
Кузнецов В. С.<sup>1</sup>, Городкин Г. Р.<sup>3</sup>, Кумейша П. Н.<sup>3</sup>, Лысенко А. Б.<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА $ZnGeP_2$ НА ПОРОГ ЕГО ОПТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

<sup>1</sup>Национальный исследовательский томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Для финишной доводки рабочей поверхности монокристалла  $ZnGeP_2$  применена магнитореологическая обработка. Получены образцы с нанометровым уровнем шероховатости рабочих поверхностей монокристалла. Проведены экспериментальные испытания по определению порога оптической стойкости. Показано, что при нанометровом уровне шероховатости на величину оптического пробоя наибольшее влияние оказывает концентрация объемных дефектов «вышедших» на поверхность кристалла.

В настоящее время наиболее мощные параметрические генераторы света (ПГС) в диапазоне длин волн 3,5-5,0 мкм созданы на основе нелинейно-оптических монокристаллов  $ZnGeP_2$  (ZGP) [1]. Данные ПГС способны генерировать излучение со средней мощностью до 160 Вт или импульсной энергией до 200 мДж при длительности импульсов 20...60 нс и частоте следования от единиц Гц до 100 кГц [2]. Однако, долговременная работа без отказа мощных ПГС на основе ZGP ограничивается оптическим пробоем – Laser-induced damage threshold (LIDT) поверхности данного материала. В связи с этим, потенциал практического использования данных ПГС среднего инфракрасного (ИК) диапазона связан, в частности, с необходимостью совершенствования методик обработки рабочих поверхностей кристаллов с целью повышения их порога оптического пробоя.

Одним из перспективных методов повышения качества поверхности является магнитореологическая обработка / полирование (МРО) [3], которое, в том числе, все чаще используют при финишной доводке лазерных кристаллов для повышения порога лучевой стойкости и снижения уровня шероховатости. Представленные в данной работе исследования посвящены проверке возможности использования МРО в качестве метода удаления дефектного слоя после тонкого полирования и снижения уровня шероховатости поверхности монокристалла ZGP. Оценивалось влияние магнитореологической обработки на порог оптического пробоя ZGP.

Для проведения исследований были использованы 2 образца монокристалла ZGP: образец №1 и №2 с размерами  $6 \times 6 \times 20$  мм<sup>3</sup>. Исследуемые образцы были вырезаны из монокристаллической були ZGP (производства ООО «ЛЮК», г.Томск, Российская Федерация) под углами  $\theta = 54,5^\circ$  и  $\varphi = 0^\circ$  относительно оптической оси. Начальная полировка рабочих поверхностей, обоих исследуемых образцов производилась на полировально-доводочном станке 4-ПД-200 (СЗОС, г. Сморгонь, Республика Беларусь). Начальная обработка состояла в полировке на батистовом полировальнике с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 0,5/0 (средний размер зерна 270 нм). При этом съем материала составлял ~ 50 мкм с каждой стороны, что позволяло убрать трещиноватый слой, образующийся в процессе резки кристалла на ориентированные пластинки и их предварительной шлифовки. Далее образцы дополнительно обрабатывались на батистовом полировальнике с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 0,25/0. После этого образцы дополировывались на смоляном полировальнике, изготовленном из полировальной смолы с использованием синтетического алмазного порошка АСМ 0,25/0.

Рабочие поверхности образца № 2 дополнительно подвергались МРО с двух торцов. МРО осуществляли на 5-ти координатной установке с ЧПУ УМО-00.00.000 (ИТМО, Минск, Республика Беларусь). Для МРО использовали жидкость на неводной основе с магнитными частицами из карбонильного железа добавлением наноалмазов. С целью повышения произ-



водительности съема материала с поверхности была применена двухстадийная МРО, включающая жесткий и мягкий режимы, отличающиеся величиной зазора между рабочим колесом и обрабатываемой деталью. На установке образец кристалла ZGP закрепляли в держатель, выполненный из фторопласта.

Шероховатость поверхности образцов № 1 и № 2 измеряли на 3D оптическом профилометре MicroXAM-800 (KLA-Tencor, США). Образец №2 измеряли дважды до и после МРО. Для всех образцов использовался фазовый режим PSI и объектив Nikon X50. Поле зрения составляло 116x152 мкм. Выполнялись оценки следующих параметров по ИСО 4287-2014: среднеквадратичной глубины шероховатости ( $R_q$ ), среднеарифметического отклонения профиля шероховатости от средней линии ( $R_a$ ) и суммы средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля ( $R_z$ ).

Результаты измерения параметров шероховатости образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры шероховатости	Параметры шероховатости поверхности образцов ZGP		
	Образец 1	Образец 2	
		исходная	после МРО
$R_z$ , нм	1,56	1,46	1,06
$R_a$ , нм	0,227	0,218	0,154
$R_q$ , нм	0,289	0,274	0,193

Анализ топографии поверхности образца № 1 и образца № 2 полированных по традиционной технологии показал, что рельеф поверхностей сформирован под воздействием разнонаправленного движения рабочего инструмента, имеются единичные протяжённые царапины глубиной до 1,3 нм. Топография поверхности образца № 2 после МРО не содержит указанных царапин и представлена менее текстурированным профилем, сформированным под воздействием магнитореологической жидкости (рисунок 1). У поверхности после МРО наблюдается значительное улучшение параметров шероховатости в 1,37-1,42 раза. В отличие от [4], где авторы достигли нанометрового и субнанометрового уровня шероховатости поверхности образцов кристалла ZGP, у образцов, исследуемых в данной статье, зафиксирован агнстремный уровень шероховатости:  $R_a$  2,27Å для образца № 1 и  $R_a$  1,54Å для образца № 2 после МРО.

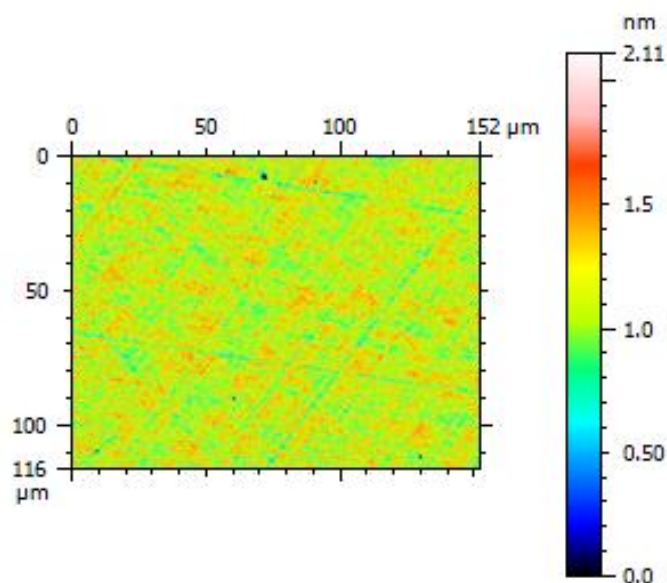


Рисунок 1 – Топография поверхности образца № 2 после МРО

Съем материала после МРО с поверхностей образца № 2 составил: сторона А – 6,95 мкм, сторона В – 9,50 мкм. Фактически при МРО обрабатывалась площадь не 6x6 мм, а

22x20 мм, поэтому общее время обработки стороны А составило – 435 мин, а стороны В – 345 мин. Если из общего времени МРО вычесть время, связанное с разгоном и реверсом рабочего инструмента, то эффективное время нахождения рабочего инструмента на поверхности кристалла составило 8,2% от общего времени: для стороны А – 28 мин, В – 36 мин. Таким образом материал показал хорошую полируемость. Для повышения эффективности использования оборудования, целесообразно в дальнейшем предусмотреть групповой тип обработки кристаллов ZGP при МРО. Дополнительно, применение МРО позволило более точно охарактеризовать возможные структурные дефекты, вышедшие на поверхность монокристалла имеющие размер ~ 0,5-1,5 мкм.

На рисунке 2 представлены результаты исследования LIDT образца № 1 (полированного по классической технологии) и образца № 2 сразу после МРО полировки.

Несмотря на то, что у образца, подвергнувшегося МРО наблюдалось существенное улучшение параметров шероховатости поверхности по сравнению с образцом, отполированным по классической технологии LIDT, остался практически неизменным. Отсутствие разницы в пороге пробоя для двух образцов, вероятнее всего связано с тем, что значение LIDT при англ-стремных параметрах шероховатости поверхности определяется в большей степени уже не качеством полировки, а физическими ограничениями структурного строения кристалла. Выдвинуто предположение, что на LIDT оказывали наибольшее влияние дислокации или объемные дефекты «вышедшие» на полированную поверхность, чем уровень шероховатости.

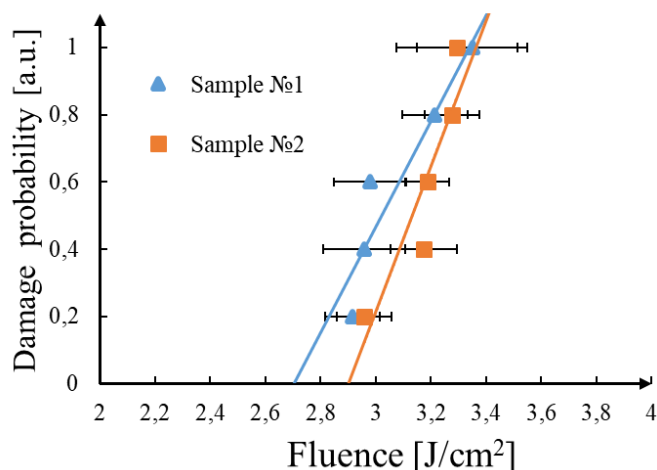


Рисунок 2 – Зависимость вероятности оптического пробоя образцов № 1 (Δ) и № 2 (□) от плотности энергии падающего лазерного излучения

Таким образом при англ-стремном уровне шероховатости решающим фактором, влияющим на величину LIDT, является концентрация объемных дефектов «вышедших» на поверхность кристалла.

#### Список литературы

1. Schunemann P.G., Zawilski K.T., Pomeranz L.A., Creeden D.J., Budni P.A. Advances in nonlinear optical crystals for mid-infrared coherent sources // Journal of the Optical Society of America B. - 2016. - V. 33. - N. 11. - P. D36-D43.
2. Qian C., Yao B., Zhao B., Liu G., Duan X., Ju Y., Wang Y. High-speed robust polarization modulation for quantum key distribution // Optics Letters. - 2019. - V. 44. - N. 21. - P. 5262-5265.
3. Sutowska M., Sutowski P. Contemporary applications of magnetoreological fluids for finishing process // Journal of Mechanical and Energy Engineering. - 2017. - V. 1 (41). - No. 2. - P. 141-152.
4. Z. Lei, C. Zhu, C.Xu, B. Yao, C. Yang Growth of crack-free ZnGeP<sub>2</sub> large single crystals for high-power mid-infrared OPO applications // Journal of Crystal Growth. - 2014. - V.389. - P. 23-29.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Рассмотрена модель оптоволоконного сенсора силы тока, использующий зависимость характеристической частоты вынужденного рассеяния Манделъштама-Бриллюэна от деформации оптического волокна, позволяющий измерять как значение силы тока, так и определять участок, где проводится измерение. Приведены метрологические характеристики сенсора, позволяющие рассчитать параметры работы на этапе конструирования.

Вопросы эффективного энергопотребления тесно взаимосвязаны с точным измерением силы тока при любых его значениях. Кроме этого, значение имеет независимость измерительного устройства от измеряемой величины, так называемая развязка. Оптические датчики обладают рядом преимуществ. В волоконно-оптических датчиках с внешним чувствительным элементом измерение параметров производится в области за пределами волокна. То же относится и к гибридным волоконно-оптическим датчикам. Сами датчики можно рассматривать как «черные ящики», при этом оптические волокна используются для переноса света к «ящикам» и данных – в обратном направлении. В большинстве случаев понятия датчиков с внешним чувствительным элементом и гибридных датчиков взаимозаменяемы. Основное различие возникает в случае использования энергии светочувствительных элементов, когда луч света используется для приведения в действие электронного датчика и данные возвращаются обратно по волоконно-оптическому каналу. В этом случае термин «гибридные» является более подходящим.

Большой и важный подкласс датчиков, в которых оптическое волокно используется в качестве чувствительного элемента, или чистоволоконных датчиков, – это датчики интерферометрические. Большинство датчиков, обеспечивающих наиболее высокую производительность, относятся именно к этому подклассу.

В настоящее время активно изучается и применяется новый класс волоконно-оптических датчиков, использующих вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна. При создании таких сенсоров используется свойство изменения характеристической частоты вынужденного рассеяния при изменении температуры и деформации волокна. Кроме этого, такие сенсоры позволяют измерять не только воздействие величины, но и ее местоположение, что не могут обеспечить оптоволоконные сенсоры, работающие на других принципах.

Увеличение соотношения сигнал-шум достигается использованием обратного Фурье преобразования. Применение этого преобразования уменьшает погрешность, связанную со спонтанным излучением Манделъштама-Бриллюэна [1].

Схема установки для измерения методом АБОЧД представлена на рисунок 1.

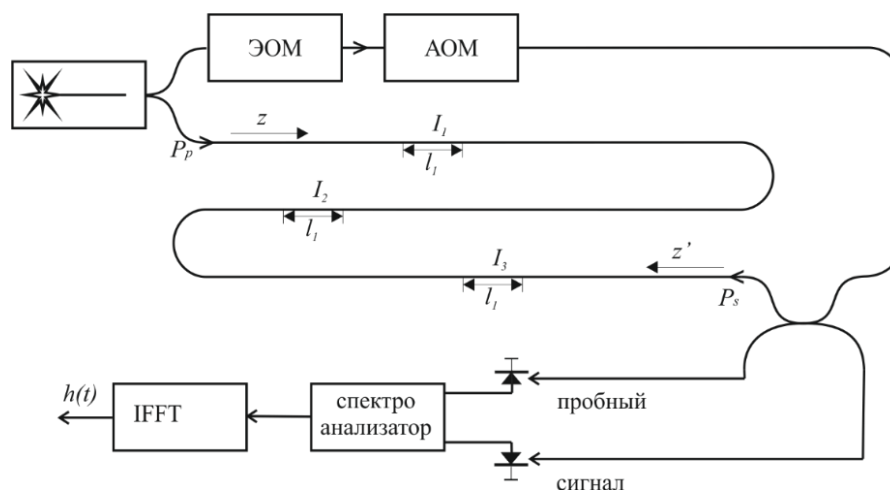


Рисунок 1 – Принципиальная схема измерительной установки методом АБОЧД

В качестве чувствительного элемента используется одномодовое оптическое волокно, покрытое проводящей оболочкой длиной  $L$ , закрепленное вдоль токовой шины. При пропускании тока  $i$  по проводящей оболочке между шиной и оболочкой волокна возникает сила Ампера, она вызывает деформацию оптического волокна. В установке используется узкополосный лазер, излучение которого разделяется на две части. С левого конца волокна вводится непрерывное излучение узкополосного лазера с частотой  $f_p$  и мощностью  $P_p(0)$ . С правого конца волокна подается излучение с ослабленной мощностью  $P_s(L)$ , частота которого  $f_s$  сдвинута в низкочастотную область с помощью электрооптического модулятора по сравнению с частотой лазера накачки на величину характеристической частоты ВМБР  $f_B$  волокна [1]. Значение данной характеристической частоты зависит от деформации волокна. В результате ВРМБ излучения пробного лазера в волокне возникает волна Стокса, которая распространяется противоположно распространению излучения пробного лазера.

Акустооптический модулятор (АОМ) модулирует излучение пробного лазера по гармоническому закону в пределах от 10 Гц до 80 МГц. Установленная разность частот  $\Delta f = f_p - f_s$  между двумя лазерами является зависимой от деформации характеристической частотой вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна на определенном отрезке волокна.

Мощность модулированного излучения пробного лазера и лазера накачки детектируется фотодиодами (ФД). После математической обработки получаем комплексную передаточную функцию  $s(z, \Delta f)$ .

Результаты моделирования представлены на рисунке 2. Зависимость функции отклика от длины позволяет обнаружить расположение участков и их длину. Согласно зависимости функции отклика от частоты определяется, какой частоте соответствует минимум передаточной функции на различных участках и тем самым можно определить деформацию. Сила тока будет определяться по формуле:

$$I = c\varepsilon, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока в шине, А;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $c$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от размера волокна, его модуля Юнга, а также расстояния между волокном и шиной. В данной модели  $c = 0,216 \cdot 10^3$  А.

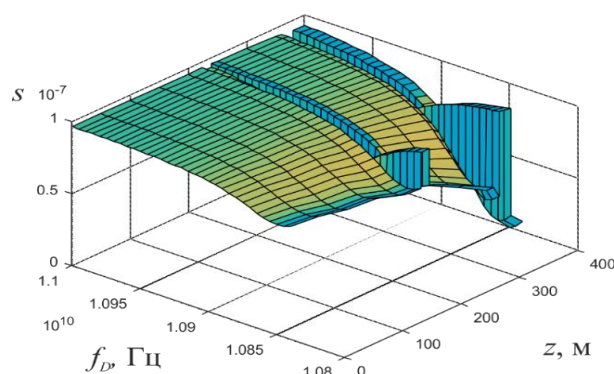


Рисунок 2 – Зависимость функции отклика  $s$  от длины оптического волокна  $L$  и от разности частот лазеров  $\Delta f$ .

В результате проведенного моделирования получены результаты: на участке с координатой  $z=80$  м сила тока  $I$  составила 2,2 кА, на участке с координатой  $z=180$  м –  $I=4,4$  кА и на участке с координатой  $z=240$  м –  $I=25$  кА.

В представленной модели разрешающая способность достигает величины 0,22 кА. Максимальное значение определяется не только возможностями электрооптического модулятора, но и изменением свойств оптического волокна под действием деформации. Максимальное измеренное значение тока в представленной модели составило 25 кА.

Особенностью представленного сенсора является то, что характеристическая частота ВРМБ зависит не только от деформации, но и от температуры.

При использовании оптического волокна на основе  $\text{GeO}_2$  значение коэффициента усиления ВРМБ изменяется в зависимости от воздействующей величины (рисунок 3). Эти данные были использованы при построении модели температурного и деформационного воздействия на одном и том же участке [2].

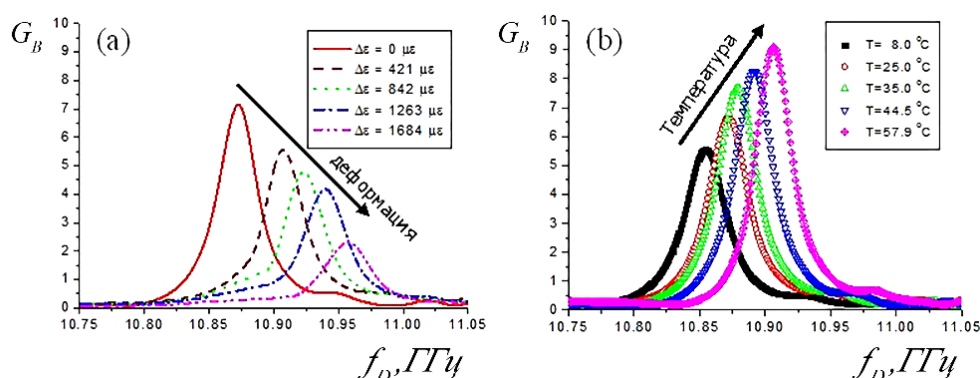


Рисунок 3 – Зависимость усиления мощности пробного сигнала от разности частот накачки и пробного сигнала при деформационном (а) и температурном (б) воздействии на оптическое волокно с добавлением  $\text{GeO}_2$ .

Было проведено моделирование температурного и деформационного воздействия на одном и том же участке. Величина передаточной функции различна для изменения температуры и деформации из-за различных коэффициентов усиления (рисунок 4), что позволяет разделить паразитный температурный сигнал и полезный деформационный.

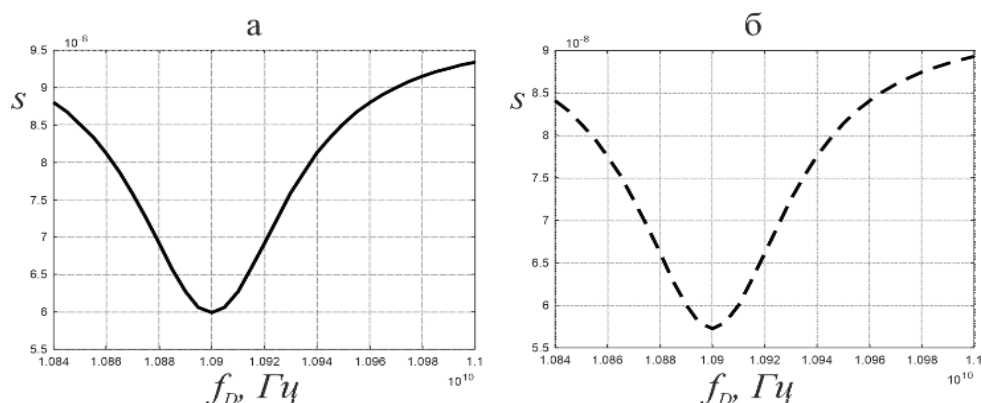


Рисунок 4 – Зависимость передаточной функции от разности частот накачки и пробного сигнала в случае деформационного (а) и температурного (б) воздействия

Проведена априорная оценка параметров измерительной системы исходя из математической модели вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне. Пространственное разрешение сенсора при определении длины и местоположения участков волокна составляет 0,06 м при использовании амплитудной модуляции оптического сигнала в пределах от 10 Гц до 800 МГц. Разрешающая способность сенсора составляет 0,22 кА при разности частот излучения накачки и пробного  $\Delta f=500$  кГц, максимальное значение силы тока 25 кА при разности частот излучения накачки и пробного  $\Delta f=50$  МГц.

#### Список литературы

1. Godolla T., Krebber K. Fibre sensors for distributed temperature and strain measurements using Brilluoin scattering and frequency-domain methods // Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3105. P. 168–179.
2. Янукович, Т.П., Исмаилова, А.С. Моделирование работы оптоволоконного сенсора температуры и деформации с использованием рассеяния Мандельштама-Бриллюэна // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022) : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. – Минск : БГУ, 2022. – с.257-260

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЦЕНТРА ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ПАРАЛЛАКСА

Институт физики НАН Беларуси им. Б.И. Степанова, Минск, Беларусь

В работе рассмотрено устройство, позволяющее определить световой центр источника оптического излучения, имеющего форму излучающей поверхности любой сложности. Устройство разработано на основе метода параллакса, позволяет, как выполнить юстировку источника оптического излучения на оптической оси фотометрической установки, так и определить расстояние измерения между световым центром источника излучения и входной апертурой приемника излучения.

### Введение

При выполнении традиционных фотометрических измерений с использованием эталонных ламп накаливания необходимо, чтобы нить накала лампы занимала строго заданное положение относительно входной апертуры приемника излучения и оптической оси фотометрической установки. Неточность в позиционировании нити накала, при юстировке относительно оптической оси измерительной системы, приводят к увеличению неопределенности измерений фотометрических характеристик источников света. Типичный метод юстировки нити накала ламп основан на использовании диоптрийных трубок (телескопов). Используя этот метод, установка нити накала в требуемое положение осуществляется последовательными приближениями, что требует особой концентрации внимания и большого количества времени. Для упрощения задачи юстировки производители эталонных ламп делали отметку на колбе лампы или устанавливали (определяли) базовую плоскость.

Такое положение дел всех устраивало долгие годы и к нему привыкли. Но широкое применение светодиодов в последние десятилетия вновь сделало вопрос юстировки актуальной проблемой. Сложность юстировки светодиодов, в общем случае, обусловлена особенностью их конструкции: небольшой светодиодный чип помещен в пластиковый корпус с полусферической поверхностью. Даже рекомендации CIE 127:2007 [1], на основе которых разрабатывались международные и национальные стандарты, не улучшили ситуацию. В соответствии с этими рекомендациями расстояние измерения устанавливается между плоскостью апертуры приемника излучения и центром корпуса светодиода при ориентации на его механическую ось. Также в [1] отмечено, что механическая ось светодиода и его оптическая ось могут существенно отличаться. Юстировка и определение расстояния фотометрирования, при ориентации на использование механическую ось, не вызывает серьезных затруднений. Однако для корректного измерения оптических характеристик светодиода необходимо определить световой центр светодиода путем измерения пространственного распределения его излучения [2]. В последние годы задача еще больше усложнилась, так как появились светодиодные источники, состоящие из десятков светодиодных чипов или светодиодов. В том числе и эталонные источники излучения (лампы), например [3, 4]. Излучающая поверхность таких источников очень неровная. Поэтому сложно правильно определить точку, относительно которой необходимо выполнить юстировку, и, соответственно, измерить оптические характеристики источника излучения в целом.

Возможным решением проблемы юстировки источников излучения, имеющих сложную форму излучающей поверхности, может стать использование устройства, разработанного на основе метода параллакса. В общем случае метода параллакса заключается в следующем: определяется положение каждой отдельной малой излучающей поверхности (отдельного сегмента источника), излучение которой попадает в апертуру приемника излучения, и вычисляется среднее положение для всех малых поверхностей. Т.е. излучающую поверхность источника излучения, имеющего форму любой сложности, можно представить в виде плоскости.

### Конструкция устройства для определения светового центра источника излучения

Для реализации метода параллакса, нами разработано устройство для определения светового центра источника излучения. На рисунке 1 представлена схема устройства, а на рисунке 2 представлена схема применяемой маски.

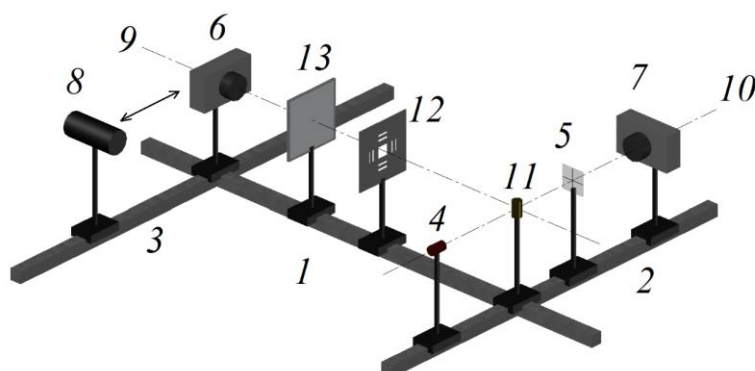


Рисунок 1 – Схема устройства

1, 2, 3 – оптические рельсы; 4 – юстировочный лазер; 5 – метка с перекрестием; 6, 7 – видеокамеры; 8 – приемник излучения; 9, 10 – оптические оси; 11 – источник излучения; 12 – маска; 13 – экран.

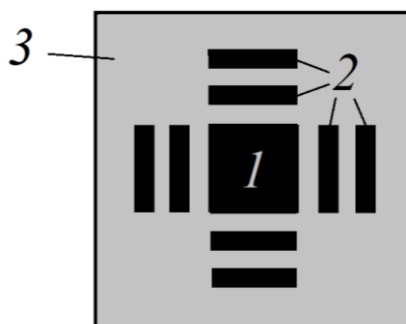


Рисунок 2 – Схема маски

Устройство работает следующим образом. Излучение источника 11 проходит через маску и проецируется на экран 13 в виде изображения квадрата и щелей. Центр квадрата маски предназначен для выравнивания источника излучения путем совмещения его центра с изображением квадрата на полупрозрачном экране. Отклонение изображения щелей на экране позволяет определить расстояния до источника излучения. Цифровая камера 9 передает изображение экрана на компьютер для последующих расчетов.

Маска (рисунок 2) представляет собой непрозрачную пластину 3, в которой имеются расположенные периодически по вертикальной и горизонтальным осям щели 2. Квадратное отверстие 1 расположено на пересечении осей.

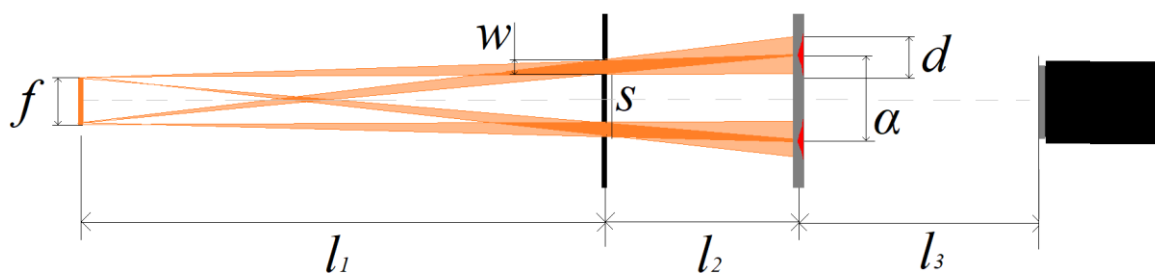
### Определение расстояния между источником излучения и приемником излучения

Используя рассматриваемое устройство, расстояние между источником и приемником излучения можно определить следующим образом. На рисунке 3 представлена оптическая схема устройства.

Расстояния между источником и приемником излучения  $l_{\text{md}}$  рассчитывается по формуле

$$l_{\text{md}} = l_1 + l_2 + l_3 = l_2 \cdot \left( \frac{\alpha}{s \cdot n} - 1 \right)^{-1} + l_2 + l_3. \quad (1)$$

Расстояние  $l_3$  определяется традиционными методами, например концевыми мерами.



$l_1$  – расстояние от маски до светового центра;  $l_2$  – расстояние от маски до экрана;  
 $l_3$  – расстояние между входной апертурой приемника излучения и экраном  $s$  – шаг расположения щелей маски;  
 $n$  – порядок меток;  $\alpha$  – отклонение луча на экране соответствующего порядка;  
 $f$  – габаритный размер излучающей поверхности источника;  $w$  – размер щели маски

Рисунок 3 – Оптическая схема устройства

Диапазоны возможных расстояний измерения оцениваются по следующим критериям

$$l_1 \leq s \cdot l_2 \cdot (l_{\min})^{-1}, \quad (2)$$

где  $l_{\min}$  – минимально измеряемое расстояние.

Влияния габаритных размеров излучающей поверхности источника можно оценить как

$$l_2 < l_1 \cdot (f \cdot w^{-1} - 1)^{-1}. \quad (3)$$

### Заключение

Таким образом, применяя метод параллакса можно определить световой центр источника оптического излучения, имеющий форму излучающей поверхности любой сложности. Разработанное на основе метода параллакса устройство позволяет, как выполнить юстировку такого источника на оптической оси фотометрической установки, так и определить расстояние измерения между световым центром источника излучения и апертурой приемника излучения.

### Список литературы

1. CIE, Technical Report CIE Publication 127, 2nd Ed., Measurement of LEDs, 2007.
2. S.V. Nikanenka, et al., Influence of spatial characteristics of solid-state light sources on results of measurements of their photometric and radiometric properties, in Proceedings of 28th CIE session, CIE 216:2015, Vol. 1, Part 2, 1389–1395, 2015.
3. A. Sperling, et al., Multiple Transfer Standard for Calibration and Characterisation of Test Setups in Industry, Proceedings of NEWRAD 2017, ed. Local Organizing Committee, 2017. – P. 94 – 95.
4. Yanfei Wang, et al., Intersection Point Method for Measuring Spectral Irradiance of High-Power UV-LED with a Spectroradiometer, Proceedings of NEWRAD 2017, ed. Local Organizing Committee, 2017. – P. 104– 105.



УДК 535.37+621.371.378

Богданович М.В., Григорьев А.В., Дудиков В.Н., Рябцев Г.И., Татура П.О., Шпак П.В.,  
Щемелев М.А.

## КОМПАКТНЫЙ МОЩНЫЙ ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости 68–2,  
Минск 220072, Беларусь

Разработан и изготовлен пикосекундный лазер, выходные параметры которого позволяют проводить обработку полупроводниковых и диэлектрических материалов. Особенностью лазера является квазинепрерывный режим работы (частота следования импульсов 50–200 кГц). Оригинальная двухкаскадная схема оптического усиления сигнала задающего лазера формирует выходной пучок излучения мощностью на уровне 3,5–10 Вт на длине волны 1064 нм. Параметр качества пучка 2,0–2,5 обеспечивает возможность жесткой фокусировки излучения для прецизионной обработки материалов. С использованием микрообъектива, трехосной системы позиционирования и устройства выборки лазерных импульсов созданы 2-х и 3-х мерные структуры на поверхностях обрабатываемых объектов.

Пикосекундные лазеры – перспективные источники когерентного излучения для применения в различных технологических процессах [1,2]. Применение в таких источниках блоков лазерной диодной накачки позволяет заметно снизить габариты и уровень общего энергопотребления, что способствует ускоренному внедрению и расширению областей применения пикосекундных лазеров в научных исследованиях и промышленности.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию характеристик, а также установлению наиболее эффективных режимов функционирования мощного компактного пикосекундного лазера с диодной накачкой, генерирующего в ближней ИК–области.

Разработанный лазер включает в себя задающий лазер и два оптических усилителя, причем первый усилитель работает по регенеративной схеме, а второй – по двухпроходовой. Данный подход позволяет добиться плавной перестройки частоты усиленных импульсов в пределах частот следования импульсов 50–200 кГц с сохранением высокой выходной мощности и качества излучения. Накачка всех усилителей и задающего лазера осуществляется по продольной схеме.

Принципиальная схема задающего пикосекундного генератора лазерных импульсов на основе синхронизации продольных мод в быстром насыщающемся поглотителе представлена на рисунке 1.

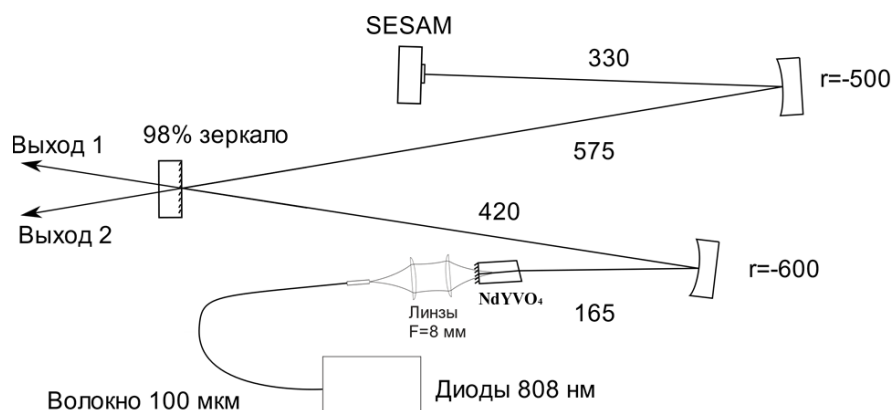


Рисунок 1 - Принципиальная оптическая схема пикосекундного генератора лазерного излучения. Расстояния между компонентами и радиусы кривизны зеркал указаны в мм

В качестве активной среды генератора и обоих усилителей применены кристаллы ванадата иттрия, допированного ионами неодима, с концентрациями, оптимальными для каждого каскада. Частота следования импульсов задающего генератора составляет 99,417 МГц. Выходная мощность каждого из двух каналов генератора составляет 150–170 мВт в режиме синхронизации мод. Выходное излучение первого канала используется для привязки сигналов синхронизации в электронной системы управления к оптическому пугу 99,417 МГц, излучение второго канала подается на вход регенеративного усилителя через систему выборки импульсов (палс–пикер). Палс–пикер представляет из себя ячейку RTP на основе двух кристаллов 4x4x10 мм каждый, полуволновую пластину для поворота плоскости поляризации и пара поляризаторов с двух сторон ячейки. Применение пары поляризаторов крайне важно для защиты задающего генератора от обратного излучения со стороны регенеративного усилителя. Палс-пикер позволяет выбирать из непрерывного пуга частотой 99,417 МГц импульсы с частотой следования 50-200 кГц.

Регенеративный усилитель также, как и задающий лазер, построен по схеме продольной диодной накачки. Вход и выход из регенеративного усилителя реализованы с помощью фарадеевского ротатора, фазовой пластины, пары поляризаторов и электрооптической ячейки RTP с двумя нелинейными элементами размером 8x8x10 мм каждый. Крайне важно обеспечить параллельный пучок излучения в кристаллах RTP, а также защитить их от неоднородного нагрева остаточным излучением накачки, поэтому перед ними устанавливается защитная диафрагма. При мощности диодной накачки менее 30 Вт выходная мощность регенеративного усилителя достигает 3,5 Вт при частоте следования импульсов 200 кГц. Минимальная частота выходных импульсов системы составляет 50 кГц при мощности излучения 1,5 Вт. Параметр качества пучка на выходе усилителя  $M^2$  составляет 1,35 при мощности излучения менее 1,5 Вт и увеличивается до значения  $M^2$  2,0–2,5 с увеличением мощности выходного излучения до 3,5 Вт.



Рисунок 2 – Пуг ультракоротких импульсов на выходе регенеративного усилителя (частота 100 кГц)

Для дальнейшего повышения выходной мощности излучения (при необходимости) применен двухпроходовой усилитель на основе двух кристаллов Nd: YVO<sub>4</sub> с концентрацией 0,5 и 1,0 ат. % с возбуждением излучением лазерной диодной линейки, излучающей на длине волны 880 нм (мощность излучения 55 Вт). Использование длины волны 880 нм позволяет минимизировать влияние эффекта термической линзы в активной среде Nd: YVO<sub>4</sub> на распространение усиливаемых пучков. В свою очередь, применение двух активных кристаллов по-

## Секция 1. Прикладные проблемы оптики и спектроскопии

следовательно (с концентрациями ионов  $\text{Nd}^{3+}$  0,5 ат. % – первый каскад усиления, затем 1,0 ат. % – второй каскад усиления) позволяет повысить эффективность поглощения излучения накачки на длине волны 880 нм, и предотвратить разрушение кристаллов вследствие перегрева.

Полная выходная мощность излучения пикосекундного лазера на длине волны 1064 нм превышает 10,0 Вт в случае двухкаскадного усиления при частоте следования импульсов 200 кГц. Следует отметить, что оконечный двухпроходовой усилитель хорошо откликается на увеличение мощности входного сигнала, что свидетельствует о том, что усилитель работает вдали от режима насыщения, и имеется дополнительный потенциал для дальнейшего роста выходной мощности пикосекундного лазера.

На рисунке 3 представлен общий вид лазерной системы, установленной на гранитном столе с П-образным порталом. На данном гранитном столе также смонтирована двухосная система позиционирования подложек, а также третья ось для реализации смещения объектива по высоте с абсолютной точностью не хуже 1 мкм, и воспроизводимостью положения не хуже 2 мкм по каждой из осей. Для реализации сценариев прецизионной обработки предусмотрена система выборки лазерных импульсов после усиления с помощью третьей ячейки Поккельса на основе кристалла DKDP, подключенной к системе позиционирования подвижками в качестве виртуальной лазерной оси.

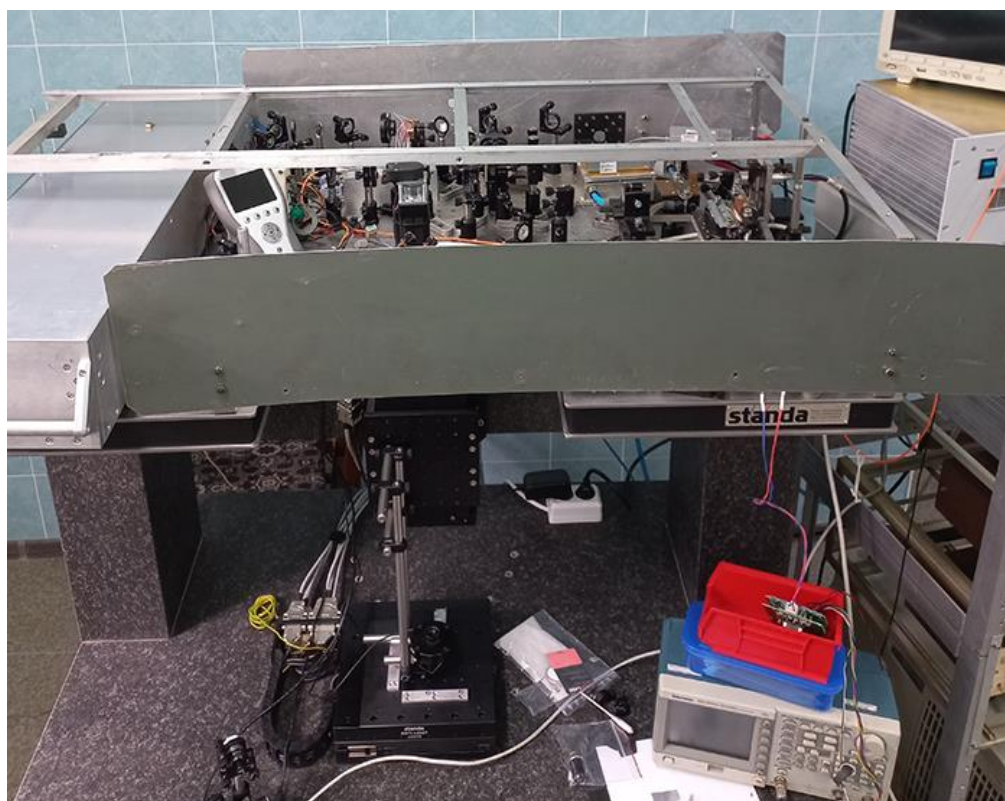


Рисунок 3 – Общий вид пикосекундной системы для обработки материалов

Разработанный и созданный пикосекундный лазер применен в Институте физики НАН Беларуси применен для технологии планарной и трехмерной обработки поверхностей различных материалов.

### Список литературы

1. Н. Истомина, Л. Корякина. LASYS–2016 // Фотоника. – 2016. – № 6/ 60. – С. 54– 68.
2. Рынок фотоники: состояние и прогноз / Информационный бюллетень ЛАЗЕРНОЙ АССОЦИАЦИИ. – № 3 (738), февраль 2023.

## **СЕКЦИЯ 2.**

# **ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ**

## **БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЗАЩИЩЕННОГО АРМ АБОНЕНТА**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета Минск, Республика Беларусь

Представлены результаты исследований и разработки основных модулей аппаратно-программной платформы безопасного автоматизированного рабочего места (АРМ) абонента системы обработки конфиденциальных данных. Задачей является разработка гибкой защищенной системы, которая может легко перенастраиваться на варианты мобильного персонального ассистента и автономного встроенного устройства обработки и передачи мультимедийных конфиденциальных данных.

### **Архитектура аппаратной платформы**

На рисунке 1 приведена общая схема состава предлагаемой аппаратной платформы. В качестве основы аппаратуры (процессорного блока) был выбран многоядерный процессор TI TDA4VM [1].

Система на чипе (SoC) TDA4VM является частью платформы архитектуры Multicore SoC. Система спроектирована как устройство с низким энергопотреблением, высокой производительностью и высокоинтегрированной архитектурой, обеспечивающей значительное улучшение вычислительной мощности, графических возможностей, обработки видео и изображений, виртуализации. Кроме того, эта SoC поддерживает самые современные функции функциональной безопасности.

Некоторые из основных отличительных характеристик устройства:

- 64-разрядная архитектура с поддержкой виртуализации и когерентной памяти, в которой используются все вычислительные возможности 64-разрядного процессора.
- Полностью программируемые промышленные коммуникационные подсистемы, обеспечивающие новые стандарты гигабитных чувствительных ко времени сетей.
- Интеграция аппаратных ускорителей обработки машинного зрения для удовлетворения обширных требований к обработке при низком энергопотреблении для приложений машинного зрения.
- Интеграция цифрового сигнального процессора (DSP) с фиксированной и плавающей запятой нового поколения, который значительно увеличивает мощность при решении широкого круга общих задач обработки сигналов.
- Надежная архитектура защищенности с изолированным контроллером безопасности, управляющим всеми безопасными конфигурациями, с высокопроизводительной схемой обмена сообщениями клиент-сервер между защищенным контроллером и всеми ядрами.

Одним из основных вариантов использования аппаратной платформы является выполнение функций процессорного блока мобильного персонального компьютерного ассистента (ПКА) и автономного встроенного устройства обработки и передачи мультимедийных конфиденциальных данных.

Особенностью предлагаемой архитектуры на (рисунок 1) является ее гибкость (в том числе применение в качестве процессорного блока как TDA4VM [1], так и AM438x [2]). Если предполагается использовать ПКА в качестве мобильного компьютера, имеется возможность подключить к процессорному блоку мини-дисплей, камеру, аудио систему, а также соединиться к сети Ethernet. Если ПКА применяется как компактное мобильное устройство, предоставляется возможность использовать ЖК-дисплей с сенсорным экраном, X16 клавиатуру, сотовый модем и/или WiFi адаптер. Если необходимо использовать ПКА в качестве автономного встроенного модуля (например, в инфраструктуре IoT), то имеется возможность подключить к процессорному блоку ряд вспомогательных сенсорных плат и датчиков через соответствующие коннекторы.

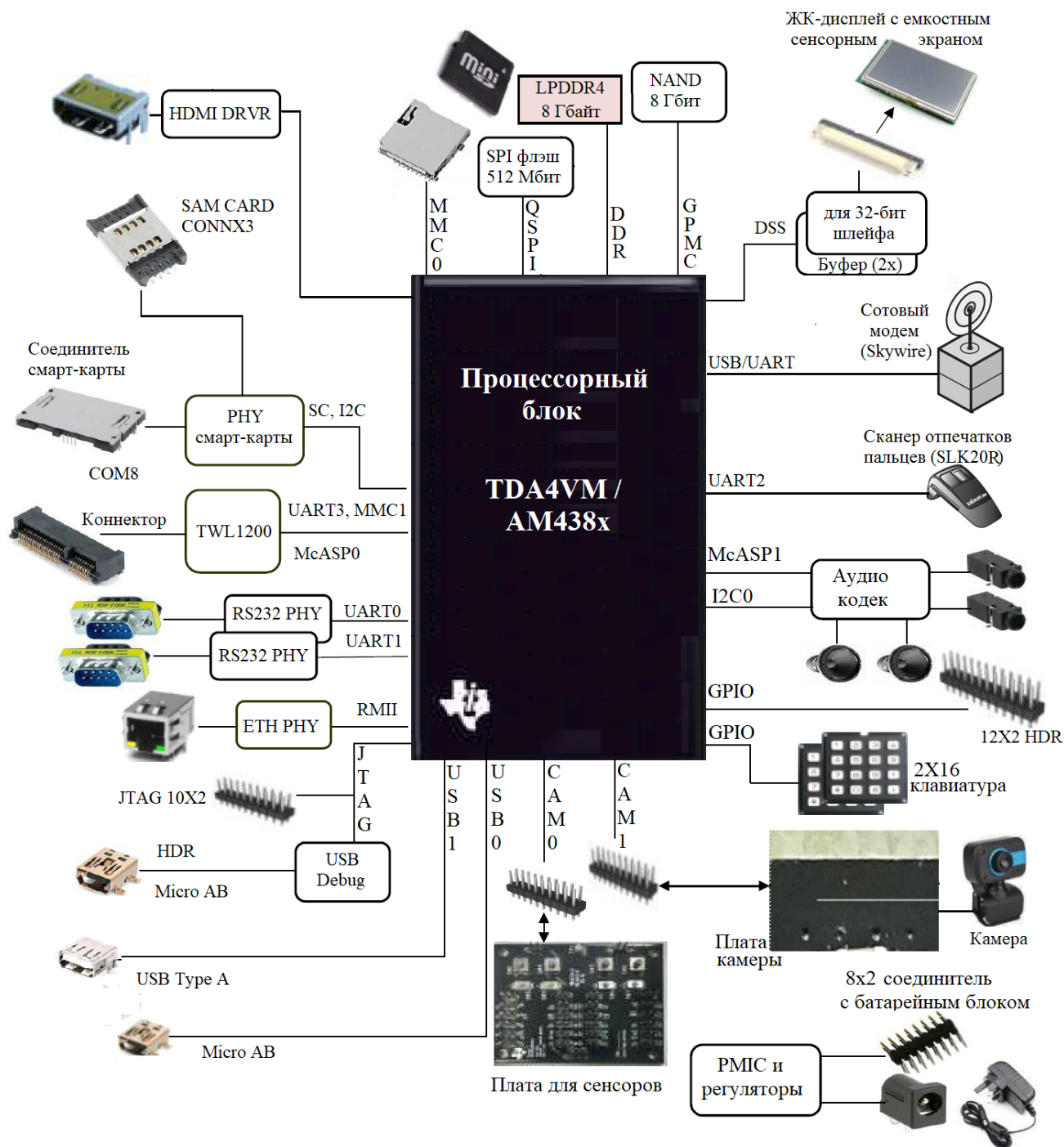


Рисунок 1 – Блок-схема варианта аппаратной реализации персонального ассистента

### Реализация схем безопасности встроенной системы

Хотя интегральные схемы (ИС), такие как микроконтроллеры (MCU), процессоры и устройства беспроводной связи, не представляют собой законченное решение для защиты приложения, они могут предоставить строительные блоки, которые можно использовать для включения функций безопасности в приложение. Можно разделить эти функции на ряд категорий [3], относящиеся к приложениям. Эти категории – «средства обеспечения безопасности». В зависимости от ресурсов, которые нуждаются в защите, и точек уязвимости, рассматриваются все соответствующие средства обеспечения безопасности, с последующим выбором функции безопасности на уровне применяемого устройства и отдельного модуля для разработки соответствующего механизма защиты. На рисунке 2 представлена структура безопасности.



Рисунок 2 – Структура безопасности встроенной системы.

Необходимо отметить, что особенностью предлагаемого построения аппаратно-программных компонент обеспечения безопасности встроенной системы является их распределенный, полуавтономный режим функционирования, позволяющий отслеживать уязвимости и реализовывать блокирующие функции для отдельных модулей, работающих в системе.

#### Список литературы

1. J721E DRA829/TDA4VM Processors. Technical Reference Manual, TI. – 2022. – 3513p.
2. Sitara AM438x processor: tamper protection. TI. – 2017. – 7p
3. Sitara Processor Security: Embedded processor security. TI. – 2019. – 10 p.

## ТЕСТИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОКОДЕРОВ MELPe

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета Минск, Республика Беларусь

В процессе обработки и передачи речевых сигналов производится их сжатие с целью сужения полосы пропускания используемых каналов связи. В зависимости от параметров сжатия происходит в той или иной степени искажение исходных речевых сигналов. В данной работе делается попытка выполнить объективную оценку качества восстановленных (после сжатия) речевых сигналов во временной и спектральной областях.

Для оценки качества кодирования/декодирования речевых данных реализованного вокодера MELPe [1] с потоком выходных данных 1200/2400 бит/с была разработана моделирующая программа, состоящая из следующих компонент:

`melpе` – модифицированный исходный исследуемый пакет программ `melp_1200` (реализация вокодера 1200/2400 бит/с), адаптированный для реализации на MS Visual Studio 2019;

`test_comp` – пакет программ оценки объективного качества кодирования/декодирования речевых данных;

`files_test` – набор файлов речевых фраз в формате `.wav` (8000 кГц, 16 бит).

В процессе выполнения программы `melpе` исходные файлы `in.wav` кодировались и после процесса декодирования на выходе получались файлы `out.wav`.

Полученные файлы далее обрабатывались программой `test_comp` для получения объективных оценок степени искажения (как во временной, так и в частотной областях) речевых данных в файлах `out.wav`, по отношению к речевым данным в исходных файлах.

Степень искажения во временной области [2] оценивалась с помощью сегментного отношения сигнал/шум  $SNR_{seg}$ :

$$SNR_{seg} = \frac{10}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \log_{10} \sum_{i=N \cdot m}^{N \cdot m + N - 1} \left( \frac{x^2(i)}{(x(i) - y(i))^2} \right) (dB), \quad (1)$$

где  $x(i)$  и  $y(i)$  –  $i$ -е отсчеты исходного и восстановленного речевых сигналов на  $m$ -ом сегменте;  $N$  – длина сегмента (при тестировании  $N = 180$  выборков, или 22,5 мс длительности сигнала);  $M$  – число сегментов в речевых данных.

Степень искажения в спектральной области [2] оценивалась с помощью трех функций: SD (искажение спектра), CD (кепстральное расстояние), DMFCC (искажение мел-частотных кепстральных коэффициентов).

Функция искажения спектра (SD) определяется следующим образом:

$$SD_{seg} = \frac{10}{M \cdot d} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=1}^D \text{abs}(\log_{10} |Y(f_n)| - \log_{10} |X(f_n)|), \quad (2)$$

где  $X(f_n)$  – спектральная составляющая исходного сигнала на частоте  $f_n$ ;  $Y(f_n)$  – спектральная составляющая восстановленного сигнала на частоте  $f_n$ ;  $D$  – число спектральных составляющих.

С помощью функции кепстрального расстояния (CD) оценивается различие между спектральными огибающими исходного и восстановленного (синтезированного) сигналов, при этом функция основывается на вычислении кепстральных коэффициентов, и имеет вид:

$$CD_{seg} = \frac{1}{M \cdot Q \cdot R} \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^Q (C_{m,n} - C'_{m,n})^2, \quad (3)$$

где  $C_{m,n}$  и  $C'_{m,n}$  – кепстральные коэффициенты сегментов исходного и восстановленного речевых сигналов;  $Q$  – число кепстральных коэффициентов,  $R$  – нормирующий коэффициент.



## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

Функция искажения мел-частотных кепстральных коэффициентов (DMFCC) основана на вычислении кепстральных коэффициентов, рассчитанных в поддиапазонах шкалы мел-частот, и определяется следующим образом:

$$DMFCC_{seg} = \frac{1}{F \cdot M} \sum_{n=1}^F \sum_{m=1}^M (CF_{m,n} - CF'_{m,n})^2, \quad (4)$$

где  $CF_{m,n}$  и  $CF'_{m,n}$  – кепстральные коэффициенты мел-частотных поддиапазонов для сегментов исходного и восстановленного речевых сигналов;  $F$  – число поддиапазонов шкалы мел-частот (равно числу кепстральных коэффициентов).

### Экспериментальные результаты

В качестве исходных речевых данных использовались два файла:

record\_s.wav (продолжительность речевой фразы – 2 сек),

record\_h.wav (продолжительность речи – 8 сек).

Программа melpe была реализована с применением следующих конфигурационных настроек:

conf\_rec (далее – rec) – чисто программная реализация базовых арифметических операций;

conf\_instr (далее – ins) – программное моделирование базовых арифметических операций (инструкций), выполняемых цифровым сигнальным процессором (DSP) (ABS, NORM, SADD, SMPY, SSHVL, SSHVR, SSUB);

conf\_long (далее – long) – реализация MELPe 1200/2400 бит/с с расширенным диапазоном представления чисел до 40-48 бит, при которой некоторые 32-битные арифметические операции (где наиболее вероятен результат с насыщением/переполнением) заменены на расширенную 40-48-битную арифметику, которая может быть поддержана вызовом соответствующих внутренних (intrinsics) инструкций DSP (например, MPLYH, MPLYL, MPLY2).

В результате выполнения программы melpe были получены 12 выходных файлов результатов кодирования/декодирования, при этом для каждого из двух исходных файлов (record\_s.wav и record\_h.wav) формировались 6 файлов (для двух скоростей 1200/2400 бит/сек с 3 конфигурационными режимами).

Для целей калибровки и масштабирования объективных оценок качества кодирования/декодирования были использованы некоторые искаженные выходные файлы (out24s\_reco.wav, out24s\_inso.wav, out24h\_reco.wav, out24h\_inso.wav).

Результаты объективных оценок степени погрешности выходных речевых файлов out.wav по отношению ко входным речевым файлам in.wav, полученных с помощью программы test\_comp, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Численные значения объективных оценок

Оценки		SNRseg	SDseg	CDseg	DMFCCseg	
скорость	норм./иск.	конфигурация	Исходный речевой файл – 2 сек			
1200	норм.	rec	17.582420	0.196256	0.023686	5.250000
		ins	18.134583	0.138125	0.023168	4.442271
		long	19.034484	0.124396	0.021764	4.402174
2400	норм.	rec	17.791588	0.211844	0.024635	5.428571
		ins	17.038241	0.201230	0.024523	4.798131
		long	17.038047	0.200244	0.024512	4.780220
	искаж.	reco	6.164728	2.589976	0.226127	31.695650
		inso	6.084768	2.579106	0.226041	32.239132
скорость	норм./иск.	конфигурация	Исходный речевой файл – 8 сек			
1200	норм.	rec	13.219126	0.154426	0.022297	6.259887
		ins	14.731437	0.125231	0.021964	5.624317
		long	14.790103	0.113936	0.021672	5.454802
2400	норм.	rec	13.099632	0.284564	0.027908	7.718750
		ins	13.617279	0.265632	0.027830	6.997093
		long	13.677594	0.269413	0.027721	6.965909
	искаж.	reco	5.377530	1.806340	0.179663	22.016949
		inso	5.465295	1.802574	0.179845	21.759887

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

Из анализа приведенных в таблице результатов численной оценки можно сделать следующие выводы:

для калибровочных (искаженных) речевых данных значения погрешности в 3-8 раз (в зависимости от оценочных функций) превышают соответствующие оценки для неискаженных данных;

использование конфигурации `long` обеспечивает снижение погрешности кодирования/декодирования, оценки которого представлены на графике (рисунок 1).

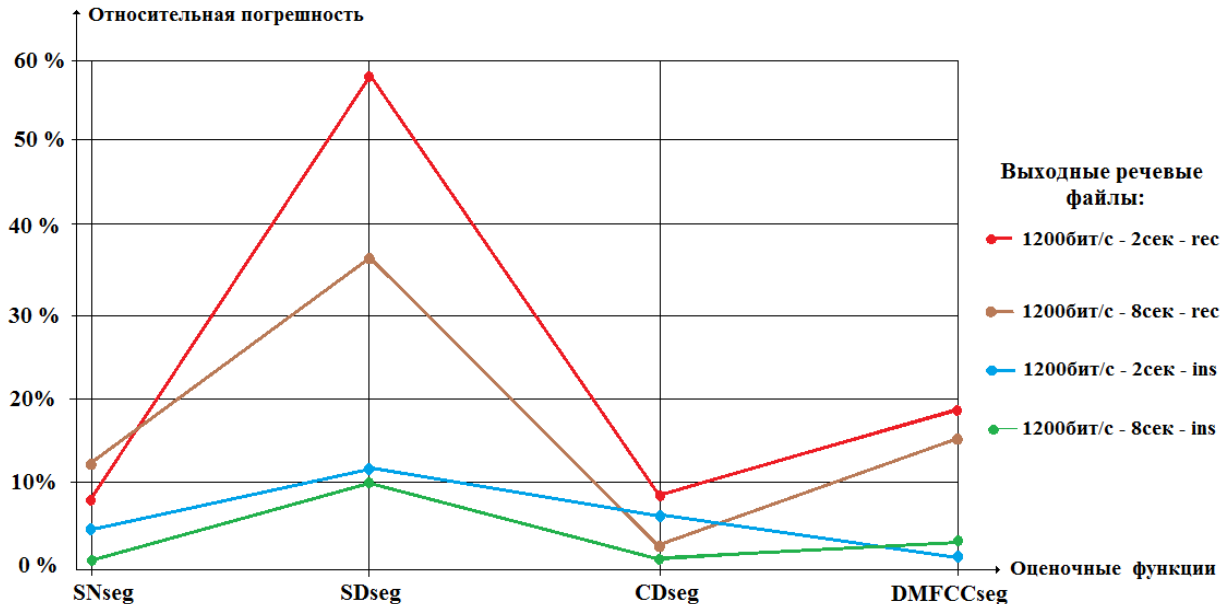


Рисунок 1 – Оценки относительного увеличения искажения (в %) выходных речевых файлов с конфигурацией `rec` и `ins` по отношению к соответствующим выходным речевым файлам с конфигурацией `long`

### Заключение

На основании приведенных результатов, для задач коммуникационной связи, можно обоснованно рекомендовать модификацию вокодера `melpe` с использованием конфигурации `long`, базирующейся на применении расширенной 40-48-битной арифметики, которая может быть поддержана соответствующими внутренними (`intrinsic`) инструкциями соответствующего сигнального процессора.

### Список литературы

1. Mixed Excitation Linear Predictive (MELP). Режим доступа: <http://melpe.org>. Дата доступа: 10.04.2023.
2. Кириллов С.Н., Комплексный алгоритм объективной оценки качества декодированного речевого сигнала при действии акустических помех /С.Н. Кириллов, В.Т. Дмитриев/ Труды СПИИРАН, Вып. 1(56), –2018. С 34-55.

УДК 53.072.001.57

Афоненко А. А.<sup>1</sup>, Колесников К. Д.<sup>1</sup>, Куперштейн Д. П.<sup>2</sup>, Лутковский В. М.<sup>1</sup>,  
Окишор А. А.<sup>2</sup>, Перл И. А.<sup>2</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены возможности ускорения алгоритмов моделирования сложных радиофизических и молекулярных систем на вычислительном кластере с использованием методов машинного обучения.

Моделирование процессов в сложных системах требует очень больших вычислительных ресурсов. Использование методов машинного обучения при моделировании сложных процессов и систем – одно из перспективных направлений, привлекательное с точки зрения ускорения вычислительного эксперимента. В структурной биологии этот метод может быть использован для расчёта свойств электронной структуры молекул [1]. Яркий пример успешной реализации этого метода – высокоточное определение теоретического значения вязкости жидких металлов с использованием обученной искусственной нейронной сети. Метод был успешно апробирован при использовании нейросети глубокого обучения на примере жидкого галлия. При этом удалось значительно увеличить пространственно-временной масштаб моделирования [2].

Цель данного проекта – отработка технологии моделирования сложных процессов на учебном вычислительном кластере, построенном на базе одноплатных компьютеров Raspberry Pi, и внедрение этой технологии в учебный процесс. Задачи, решаемые в контексте данной работы, предполагали реализацию и обучение моделей нейронных сетей, включая формирование множеств данных для их обучения.

Для тестирования работы вычислительного кластера требуются задачи, отличающиеся возможностью распараллеливания вычислений и масштабируемостью. Первая тестовая задача – аппроксимация потенциалов взаимодействия молекул и моделирование характеристик молекулярной системы [3]. При реализации метода молекулярной динамики одной из наиболее ресурсозатратных операций является вычисление этих потенциалов. В тех случаях, когда потенциал взаимодействия представляет собой гладкую функцию, допустимо использование аппроксимирующей функции, но при этом требуется коррекция численного интегрирования уравнений движения молекул. С этой целью метод молекулярной динамики реализован на платформе Raspberry Pi, и проведены соответствующие вычислительные эксперименты.

В качестве второй тестовой задачи использован расчет резонансных частот и добротности структур СВЧ диапазона, для которых существуют аналитические решения. В частности, требовалось определить  $S$ -параметры прямоугольного волновода без потерь (коэффициент отражения  $S_{11}$ ). Поперечные размеры волновода (рисунок 1), составляли 3-5 см, длина  $l \gg a, b$  (для данной задачи считается бесконечным). Параметр  $S_{11}$  нормирован на волновое сопротивление 50 Ом. Моделирование 2000 равномерно распределённых точек зависимости параметра  $S_{11}$  от частоты в диапазоне от 50 ГГц до 70 ГГц, с использованием адаптивного шага по частоте требует больших временных затрат.

Результаты одной из первых неудачных попыток ускорить моделирование за счёт применения нейронной сети с двумя скрытыми слоями представлены пунктиром на рисунке 2. Более высокой точности на тренировочной выборке удалось добиться благодаря использованию глубокой нейронной сети с 4 скрытыми слоями. Однако, на тестовой выборке обученная сеть показала недостаточную обобщающую способность и результат представленный сплошной линией на рисунке 2, что указывает на целесообразность увеличения тренировочной выборки данных [4].

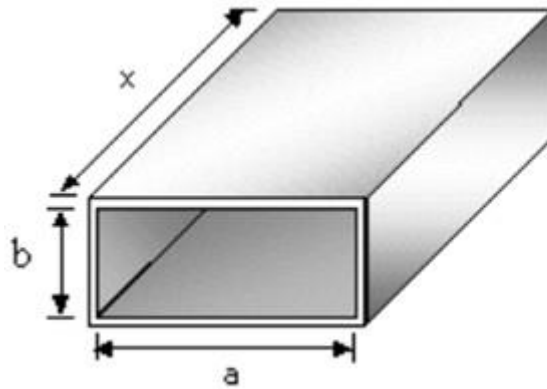


Рисунок 1 – Параметры волновода

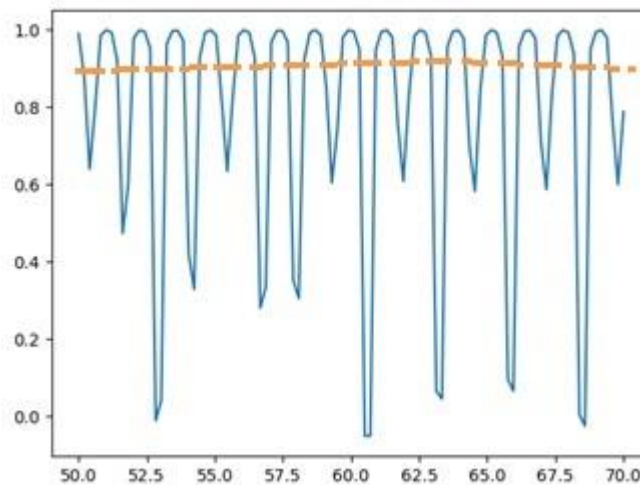


Рисунок 2 – Зависимость от частоты коэффициента отражения  $S_{11}$  и его неудачная аппроксимация (пунктир)

Представленные результаты подтверждают эффективность использования методов машинного обучения для моделирования физических процессов при условии использования глубоких нейронных сетей, достаточных тренировочных данных и вычислительных ресурсов. Эти методы могут быть использованы при выборе архитектуры вычислительного кластера в зависимости от сложности решаемых задач.

#### Список литературы

1. Машинное обучение в структурной биологии /А.Д. Головин // ФББ МГУ - [Электронный ресурс] <https://teach-in.ru/course/machine-learning-in-structural-biology>
2. Viscosity of liquid gallium: Neural network potential molecular dynamics and experimental study/ L.A. Balyakin, A.A.Yuruev, V.V. Fippov, B.R. Gelchinski //Computational Materials Study. 2022. Vol. 215. December. 111202.
3. Rapaport D.C. The Art of Molecular Dynamics Simulation // Cambridge University Press, 1995
4. Микелуччи У. Прикладное глубокое обучение. СПб, БХВ. 2020. 368 с.

## **ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ**

Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» – Минск, Беларусь

При создании новых и совершенствовании существующих методов оценки состояния человека, проведении медицинских исследований широко применяются цифровые системы и информационные технологии. Для исследования нейронной сети головного мозга человека при психических заболеваниях используются электроэнцефалограммы (ЭЭГ), представляющих собой сложные цифровые сигналы. В настоящее время для лечения резистентных форм психических и поведенческих расстройств применяется метод электросудорожной терапии (ЭСТ). Определение информативно-значимых параметров ЭЭГ, которые свидетельствовали бы о результативности ЭСТ остается проблематичным. Представлены результаты некоторых способов цифровой обработки временных реализаций электроэнцефалограмм, которые могут найти применение при сравнительном анализе ЭЭГ.

Разработка новых и совершенствование уже существующих методов оценки состояния и лечения человека является важным направлением медицинских исследований. Поэтому применение разнообразных способов обработки параметров и характеристик человеческого организма и формализация систем принятия решений являются весьма актуальными. Вычислительная и информационная мощность современных технических средств, в том числе и мобильных, позволяет существенно расширить подходы к решению разнообразных задач, связанных с обработкой длинных реализаций цифровых сигналов.

Основным функциональным элементом мозга человека является нейрон [1-2]. Работа мозга, как взаимодействие нейронов посредством электрических токов, сопровождается изменением электромагнитного поля на поверхности головы, которое можно зафиксировать специальными первичными преобразователями и преобразовать в виде изменяющихся параметров тока или напряжения, что и происходит, когда снимают электроэнцефалограмму [3]. Электроэнцефалография – процедура, которая проводится для определения электрической активности головного мозга для выявления очагов повышенной судорожной готовности его коры, что характерно для: эпилепсии; опухолей; состояний после перенесенного инсульта; структурных и метаболических энцефалопатий; расстройств сна и других заболеваний. Электроэнцефалограмма показывает симптомы нарушения работы головного мозга, позволяет оценить характер отклонений и степень их распространенности [3-5].

### **Электроэнцефалограмма, как цифровой сигнал.**

Электроэнцефалограмма отражает колебания напряжения в результате ионного тока в нейронах головного мозга и является электрическим сигналом, как результатом спонтанной электрической активности мозга в течение определенного периода времени, записанной с нескольких электродов на мозге или поверхности скальпа. Стандартной системой размещения электродов на поверхности головы, рекомендованной Международной федерацией электроэнцефалографии и клинической нейрофизиологии является система «10–20%» [5].

Результатом ЭЭГ являются цифровые сигналы, к которым исследуют с помощью методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) [6-7]. Наиболее распространен спектральный метод исследования сигналов ЭЭГ, в ходе которого анализируется мощность сигнала в частотных полосах, называемых: альфа (8-13 Гц); бета (13-35 Гц); гамма (35-70 Гц); дельта (0.3-4 Гц); тэта (4-8 Гц) [4-5].

При этом, в большинстве случаев вычисление амплитудного спектра производится на 1024-х или меньшем количестве дискретных точек [8-9], что приводит к достаточно грубому частотному разрешению. Однако, в настоящее время для исследования электроэнцефалограмм в режиме реального времени можно применить и другие способы обработки для выявления новых параметров и информативно-значимых признаков. Это цифровая фильтрация, вейвлет обработка, преобразование Гильберта-Хуанга, гистограммы распределения, разло-

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

жение сигнала на детерминированные и шумоподобные компоненты, построение временных трендов и их обработка [10].

На рисунке 1 показан один из сигналов ЭЭГ (отведение FP1-АА), а на рисунке 2 его амплитудный спектр, вычисленный для частотного разрешения  $0.03 \text{ Гц}$ .

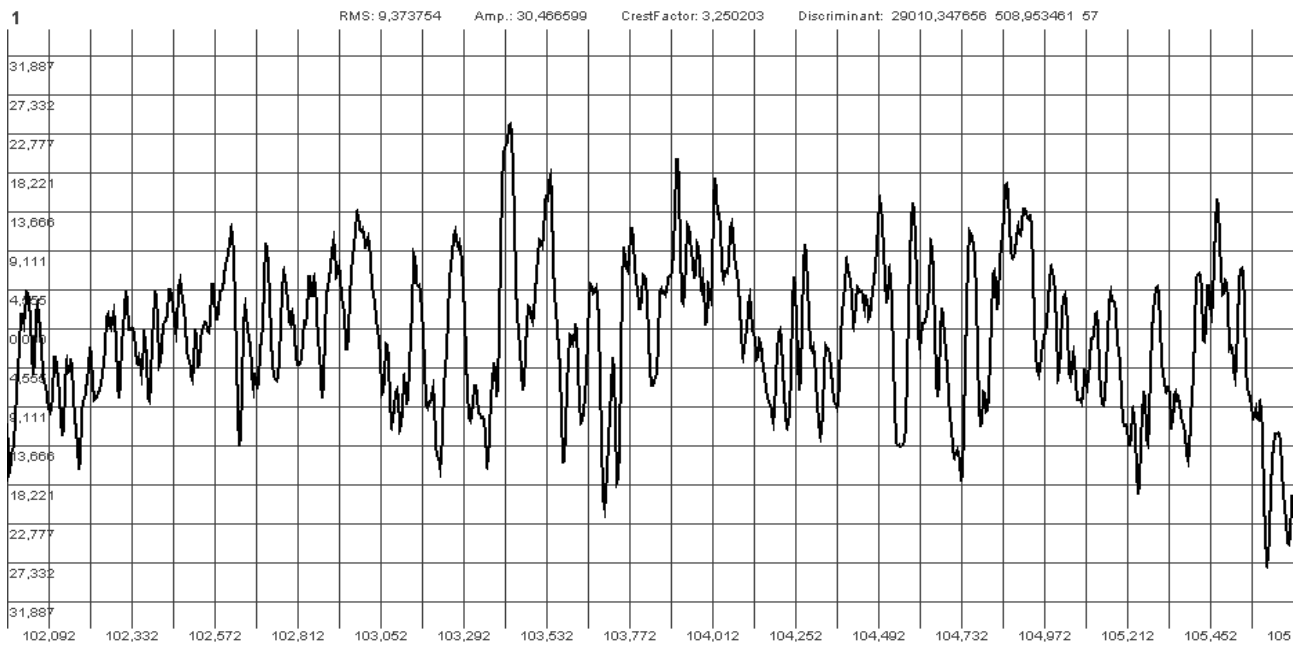


Рисунок 1 – Сигнал ЭЭГ, полученный при частоте дискретизации  $250 \text{ Гц}$

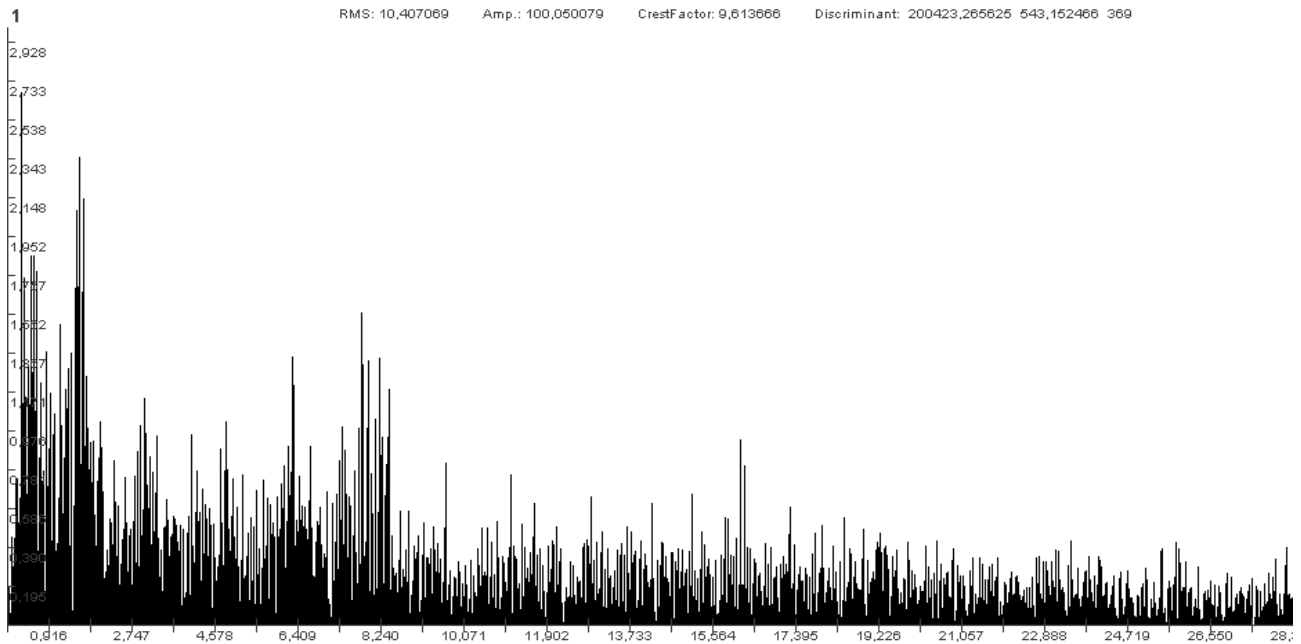


Рисунок 2 – Амплитудный спектр сигнала ЭЭГ на временном интервале  $32,768 \text{ с}$ .

Проведенные исследования сигналов ЭЭГ показали, что изменение частотного разрешения спектрального анализа приводит к изменению структуры их амплитудных спектров, что свидетельствует о случайном характере сигналов ЭЭГ [11]. При этом на определенных временных интервалах анализа гистограмма распределения сигнала ЭЭГ по уровням близка к нормальному закону распределения. Число заболеваний, которые приводят к изменениям ЭЭГ человека достаточно велико. Наиболее часто с её помощью диагностируют эпилепсию. Данный недуг является очень опасным и проявляется в припадках и судорогах, во время которых больной теряет сознание.

**Выводы.** По результатам исследования состояния нейронной сети головного мозга человека с использованием электроэнцефалограмм получают данные, которые впоследствии находят применение в медицинской практике. Результаты обработки ряда ЭЭГ позволяют сделать предположение о возможности определить группу информативно-значимых признаков, по которым можно будет делать обоснованное заключение об эффективности процедуры электросудорожной терапии или других способов лечения. Предварительный анализ сигналов ЭЭГ показал, что достаточно существенные отличия сигналов ЭЭГ наблюдаются в частотной полосе 13-35 Гц. Однако данная гипотеза требует подтверждения на большом объеме реальных данных. Можно применить и другие способы обработки для выявления новых параметров, информативно-значимых признаков и артефактов [11].

Список литературы

1. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации. Пер. с польского И. Д. Рудинского. – Москва: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. Павлова, Л. П. Доминанты деятельного мозга человека. Системный психофизиологический подход к анализу ЭЭГ / Л.П. Павлова. – СПб.: Информ-навигатор, 2017. – 430 с.
3. Зенков, Л. Р. Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии) / Л. Р. Зенков. 2-е изд., испр. и доп. – М.: МЕДпресс-информ, 2002. – 368 с.
4. Докукина, Т.В. Визуальная и компьютерная ЭЭГ в клинической практике / Т. В. Докукина, Н. Н. Мисюк. – Минск: Книгазбор, 2011. – 187 с.
5. Татум, У.О. Клиническая интерпретация электроэнцефалографии / У.О. Татум. А.М. Хусейн, С.Р. Бенбадис, П.В. Каплан. Пер. с англ. – М.: Издательский дом БИНОМ. 2020. – 264 с.
6. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
7. Айфичер, Э.С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э.С. Айфичер, Б.У. Джервис. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. – 992 с.
8. Кулаичев, А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика / А.П. Кулаичев. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 469 с.
9. Электроэнцефалография: руководство / М. В. Александров [и др.]. Под ред. М. В. Александрова. 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: СпецЛит, 2020. – 224 с.
10. Бранцевич, П. Ю. Цифровая обработка вибрационных сигналов / П. Ю. Бранцевич. – Минск: Бестпринт, 2022. – 297 с.
11. Бранцевич, П. Ю. Примеры цифровой обработки электроэнцефалограмм / П. Ю. Бранцевич // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. Ст. XIII Междунар. Науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, Минск, 8-9 декабря 2022 года). – Минск: БГУИР, 2022. – С. 314-318.
12. Метод лечения резистентных форм психических и поведенческих расстройств с использованием электросудорожной терапии. Инструкция по применению / Докукина Т.В. [и др.]. Утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 20.01.2015. – Минск: Министерство здравоохранения РБ, 2015. – 11 с.
13. Бауэр, М. Клинические рекомендации Всемирной федерации обществ биологической психиатрии по биологической терапии униполярных депрессивных расстройств. Часть 3: Острое и продолженное лечение униполярных депрессивных расстройств по состоянию на 2013 год / Бауэр М., Пфенниг А., Северус Э., Вайбрау П.С., Ж. Ангст, Мюллер Х.-Ю. от имени и по поручению Рабочей группы по униполярным депрессивным расстройствам / Современная терапия психических расстройств. – 2016. – № 2. – С. 27-40.

## УПРАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЯМИ КОМПЬЮТЕРА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ СООБЩЕНИЙ

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Управление машиной с помощью голосовых команд в реальном времени, а также ввод информации посредством человеческой речи может не только упростить жизнь современного человека, но и расширить наши возможности взаимодействия с информационными и киберфизическими системами [1]. В настоящее время технологии распознавания голосовых сообщений используются в таких сферах жизни, как осуществление голосового поиска, голосовое управление навигационными системами, обработка входящих и исходящих звонков, позволяющая клиенту заказывать товары или услуги, отвечать на опросы, получать консультации без участия менеджеров, управление системой “Умный дом”, взаимодействие человека с бытовой техникой и электронными роботами. Цель работы – реализация алгоритмов, способных распознать и перевести в текстовый формат с последующим выполнением команд, введенные человеком посредством голосовых сообщений. Для достижения цели были поставлены задачи проведения анализа исследований в области распознавания голосовых сообщений, выбор методов, разработка и реализация алгоритма распознавания речи.

**Получение сообщения и определение формата звукового файла.** После получения звукового сигнала при необходимости необходимо его оцифровать, затем перевести для хранения и дальнейшего использования в формат WAV-файла [2, 3], предназначенный для хранения данных оцифрованных аудиосигналов. Он представляет собой две, четко делящиеся, области — заголовок файла и область данных. В заголовке файла хранится информация о размере файла, количестве каналов, частоте дискретизации, количестве бит в сэмпле (глубине звучания). WAV-файл использует стандартную RIFF-структуру, которая группирует содержимое файла из отдельных секций – формат выборок аудиоданных, аудиоданные, и т.п. Каждая секция имеет свой отдельный заголовок и отдельные данные. Заголовок секции указывает на тип секции и количество содержащихся в секции байт. Такой принцип организации позволяет алгоритмам анализировать только необходимые секции, пропуская остальные, которые неизвестны, или которые не требуют обработки. Для WAV-файлов, определено довольно много типов секций, но большинство файлов содержат только две из них – секцию формата ("fmt") и секцию данных ("data"). Это именно те секции, которые необходимы для описания формата выборок аудиоданных, и для хранения самих аудиоданных. Аудио файл может содержать шум, для устранения которого в работе применена Технология Speech Recognition [1]

**Языковая модель.** В большинстве подходов принято сначала составлять фонетические транскрипции, а затем отдельной языковой моделью улучшать результат – исправлять грамматические и орфографические ошибки, убирать из расшифровки лишние буквы [4]. Обычно для этих целей применяют технологии нейронных сетей. На вход нейросети подаётся спектрограмма, а на выходе получается матрица распределения вероятностей каждой фонемы по времени. Такую таблицу также называют «emission set». Из выхода «emission set» уже можно получить ответ при помощи алгоритма «greedy decoder» (жадного декодинга), т.е. в каждый момент выбрать наиболее вероятный звук [5].

В ходе проведенного анализа литературных данных установлено, что такой подход не информативен с точки зрения правописания и может дать много ошибок, и чаще применяют метод beam search decoding с использованием перевзвешивания гипотез через языковую модель [5].

**Генерация текстового сообщения из голосового.** После того как получена таблица emission set, нужно сгенерировать текст. Декодинг — процесс генерации транскрипции по



emission set. Он производится не только по вероятностям, которые нам выдаёт акустическая модель, но и с учётом «мнения» языковой модели. Она может подсказать, насколько вероятно встретить в языке такую комбинацию символов или слов. В данной работе для декодинга использован алгоритм beam search [6]. Его идея заключается в том, что мы не просто выбираем наиболее вероятный звук в отдельный момент, а оцениваем вероятность всей цепочки с учётом уже пройденных слов, храним топ кандидатов на каждом шаге и в итоге выбираем самого вероятного. Причём при выборе кандидатов присваиваем каждому вероятность с учётом ответов и акустической, и языковой моделей.

Исходное представление звукового потока речевого сообщения выглядит как последовательность чисел по времени, а поэтому воспринимается недостаточно информативно. В большинстве случаев используется спектральное представление. Это позволяет разложить звук по волнам разной частоты и узнать, какие волны из исходного звукового потока его формировали и какие характеристики имели. Учитывая логарифмическую зависимость восприятия человеком частот, применяются мел-частотные спектральные коэффициенты. Разные сигналы отличаются по уровню громкости. Чтобы привести аудио к одному виду, нормализуются сигналы и фильтруются высокочастотным фильтром для уменьшения шумов. Pre-emphasis — фильтр для задач распознавания речи. Он усиливает высокие частоты, что повышает устойчивость к шуму и даёт больше информации акустической модели.

Исходный сигнал не является стационарным. Он делится на мелкие промежутки (фреймы), перекрывающиеся между собой, которые рассматриваются, как стационарные. К каждому фрейму применяется оконная функция Ханна, чтобы сгладить концы фреймов к нулю. Преобразование Фурье позволяет разложить исходный стационарный сигнал на совокупность гармоник разной частоты и амплитуды. Мы применяем эту операцию к фрейму и получаем его частотное представление. Когда применяем преобразование Фурье ко всем фреймам, формируем спектральное представление. Затем вычисляем мощность спектра. Она равна половине квадрата спектра.

Многочисленные научные исследования показали, что человек распознает низкие частоты лучше, чем высокие, и зависимость его восприятия — логарифмическая. Поэтому к спектру мощности применяется свертка из  $N$ -треугольных фильтров с единицей в центре. С увеличением фильтра центр смещается по частоте и логарифмически увеличивается в основании. Это позволяет захватить больше информации в нижних частотах и сжать представление о высоких частотах фрейма. Данные логарифмируются.

В качестве базовой архитектуры используется сверточная нейронная сеть, как наиболее подходящая для этой задачи модель. СНС анализирует пространственные зависимости в изображении через двумерную операцию свертки. Нейросеть анализирует нестационарные сигналы и на основе спектрограммы выявляет важные признаки в частотно-временной области. Чтобы ускорить вычисления и использовать модель на персональном компьютере, создается ограничение при выборе архитектуры. Модель не должна быть слишком глубокой и обладать большим числом обучаемых параметров: это усложняет обучение и увеличивает число операций при прямом проходе.

#### **Алгоритм распознавания голосовых сообщений**

1. Запись звукового (речевого) сообщения с устройства ввода (микрофона);
2. Преобразование полученного аудиосообщения в цифровой формат;
3. Выбор наиболее подходящего формата звукового файла для его последующего сохранения и представления в памяти компьютера;
4. Реализация алгоритма beam search decoding с последующей генерацией текста;
5. Обучение нейросети на основе полученного текста с заменой повторяющихся символов одним символом, удалением пропусков и выбором наиболее вероятных слов по словарю;
6. Использование существующих метрик для оценки качества распознавания речи;
7. Передача управляющего воздействия в операционную систему посредством использования API.

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

На данный момент реализованный алгоритм распознавания речи для управления функциями персонального компьютера способен выполнять следующие функции:

- Распознавание фразы целиком;
- Распознавание отдельных команд;
- Добавление записей в список дел;
- Воспроизведение звуковых файлов;
- Завершение работы компьютера;
- Открытие отдельных приложений;
- Удаление файлов.

**Заключение.** Основными этапами переноса аналогового звукового сигнала на цифровой носитель являются: аналого-цифровое преобразование и выбор наилучшего формата для аудиофайла, а также извлечение данных для дальнейшей обработки.

В работе рассмотрены и проанализированы алгоритмы распознавания голосовых сообщений: временные динамические алгоритмы, алгоритмы с использованием скрытых Марковских моделей и алгоритмы с использованием искусственных нейронных сетей. В результате анализа работы алгоритмов выбран алгоритм на основе искусственных нейронных сетей, позволяющий каждой новой порции обработанной голосовой информации улучшить качество обработки следующей, уменьшая количество погрешностей.

Реализован алгоритм распознавания голосовых сообщений, позволяющий распознавать как фразы целиком, так и отдельные команды, а также выполнять заданные действия в операционной системе ПК.

### Список литературы

1. Распознавание речи. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://speetech.by/index.php?q=technologies/raspoznovanie>. – Дата доступа: 16.12.2022.
2. Формат звуковых файлов WAV. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://radioprogram.ru/post/1025>. – Дата доступа: 21.12.2022.
3. Структура WAV файла. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://audiocoding.ru/articles/2008-05-22-wav-file-structure/>. – Дата доступа: 19.12.2022.
4. Как работает распознавание речи. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/vk/blog/579412/>. – Дата доступа: 18.12.2022.
5. Understanding greedy search and beam search. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://medium.com/@jessica\\_lopez/understanding-greedy-search-and-beam-search-98c1e3cd821d](https://medium.com/@jessica_lopez/understanding-greedy-search-and-beam-search-98c1e3cd821d) – Дата доступа: 18.12.2022.
6. Проблемы распознавания речи: что еще предстоит решить. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://appttractor.ru/develop/problemyi-raspoznvaniya-rechi-cto-eshhe-predstoit-reshit.html>. – Дата доступа: 18.12.2022.

## **СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ПО ВИДЕО ИЗОБРАЖЕНИЮ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ПРИ НАЛИЧИИ МАСКИ НА ЛИЦЕ**

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

Статья посвящена исследованию ключевых технологии и разных подходов к задаче обнаружения и идентификации лиц в реальном масштабе времени при наличии маски на лице. Реализован алгоритм детектирования и распознавания лиц людей с маской на лице по цифровым оптическим изображениям. Создана система распознавания лиц, входящих в здание на основе веб камеры Logitech C270 с разрешением 1280x720 и частотой кадров 30.

Обнаружение лиц – чрезвычайно важная область компьютерного зрения, необходимая для распознавания лиц, анализа настроений, видеонаблюдения и многих других областей. Обнаружение лиц на изображениях в режиме реального времени сопряжено с множеством трудностей, включая окклюзию, значительные вариации масштаба, различные условия освещения, различные позы лица, богатые выражения лица и т. д. Основная проблема обнаружения лиц в реальных сценариях заключается в производительности обнаружения. Кроме того, дополнительные трудности при решении этой задачи вносит наличие маски на лице. Решению этих проблем посвящено множество работ и был достигнут большой прогресс в разработке глубоких сверточных нейронных сетей (CNN), решающих эту задачу. Показатели средней точности (AP) для сложного набора данных WIDER FACE за последние годы улучшились с 40% до 90%. В работе описаны разные подходы как к задаче обнаружения, так и к задаче идентификации лиц при наличии маски на лице. Реализован алгоритм обнаружения и распознавания лиц для задачи детектирования входящих людей в здание.

Для произвольного изображения цель обнаружения лиц состоит в том, чтобы определить, есть ли на изображении какие-либо лица, и, если они есть, то найти местоположение изображения и размер каждого лица.

Для решения задачи обнаружения объектов возможно использование каскадных классификаторов на основе признаков Хаар – это эффективный метод обнаружения объектов, предложенный Полом Виолой и Майклом Джонсом в статье [1]. Это подход основан на машинном обучении, где каскадная функция обучается из множества изображений с целевым объектом и без него (позитивные и негативные изображения, соответственно). Затем она используется для обнаружения объектов на других изображениях.

Авторы методики YOLO (You only look once) [2] поставили обнаружение и классификацию объекта как единую регрессионную задачу, начиная с пикселей изображения и заканчивая ограничивающими прямоугольниками и вероятностями классов. Архитектура YOLO “смотрит” на изображение один раз, чтобы предсказать, какие объекты и где они находятся. Она тренируется на полных изображениях и напрямую оптимизирует производительность обнаружения. Эта унифицированная модель имеет несколько преимуществ по сравнению с традиционными методами обнаружения объектов.

Система распознавания R-CNN [3] состоит из трех модулей. Первый генерирует независимые от категории предложения региона. Эти предложения определяют набор обнаруженный кандидатов, доступных для нашего детектора. Второй модуль представляет собой большую сверточную нейронную сеть, которая извлекает вектор признаков фиксированной длины из каждого региона. Третий модуль представляет собой набор классических линейных SVM. В качестве CNN-сети использовалась преобученная архитектура AlexNet.

Для распознавания лиц применялся наиболее перспективный подход, основанный на использовании нейронных сетей. Наилучшие результаты в области распознавания лиц (по результатам анализа публикаций) показала Convolutional Neural Network (CNN) или сверточная нейронная сеть, которая является логическим развитием идей таких архитектур НС, как

когнитрона и неокогнитрона. Успех обусловлен возможностью учета двумерной топологии изображения, в отличие от многослойного перцептрона. Отличительными особенностями CNN являются локальные рецепторные поля (обеспечивают локальную двумерную связность нейронов), общие веса (обеспечивают детектирование некоторых черт в любом месте изображения) и иерархическая организация с пространственным сэмпингом (spatial subsampling). Благодаря этим нововведениям CNN обеспечивает частичную устойчивость к изменениям масштаба, смещениям, поворотам, смене ракурса и прочим искажениям.

Распознавание лица в маске – это задача распознавания закрытого лица с предварительным знанием скрытой области целевого лица. Маска закрывает область носа, рта и щек. Свободными областями могут быть глаза, брови и лоб. Таким образом, система распознавания лица в маске должна эффективно сосредоточиться на анализе признаков, которые можно извлечь из областей, включая глаза, брови и лоб, которые не закрыты маской, субъекта.

Детектирование наличия на лице маски является более тривиальной задачей чем распознавание и детектирование, так как по сути представляет из себя обычную задачу классификации. Поэтому в качестве модели по распознаванию маски на лице была выбрана простая сеть, состоящая из трех последовательно соединенных сверточных слоев. После детектирования наличия маски на лице, изображение передается в сеть (FaceNet), которая выделит вектор признаков размерностью 512. Далее полученный вектор признаков сравнивается с векторами признаков лиц из списка известных лиц для сравнения. В реализации использовалась норма Фробениуса вектора разницы между векторами, если разница между векторами больше, чем пороговое значение, то лицо считается не распознанным.

$$\|A\|_F = [\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2]^{1/2},$$

где  $y_i$  - вектор признаков лица из списка уже известных, а  $\hat{y}_i$  - неопознанный вектор.

В качестве источника видео использовалась веб камера Logitech C270 с разрешением 1280x720 и частотой кадров 30. Получаемое изображение переводится в черно-белый формат и уменьшается в разрешении на 25%. Все эти шаги сделаны с целью ускорения работы детектора положения лиц. С точки зрения точности, алгоритмы нахождения координат лица на изображении, основанные на нейронных сетях, показывают высокую точность и устойчивость к различного рода помехам (очки, маска, плохое позиционирование лица и т.п.). Однако высокая скорость их работы достигается при запуске данных алгоритмов на графических картах. Так как решение хотелось сделать универсальным, не привязываясь к наличию на ноутбуке видеокарты одного производителя (Nvidia), то выбор пал на алгоритмы классического компьютерного зрения, а именно HOG, так как HOG применяется в промышленных решениях детектирования объектов в случаях, когда скорость обработки имеет важное значение.

Структурная схема работы алгоритма распознавания лиц людей при наличии маски на лице представлена на рисунке 1. Пример работы разработанного программного приложения, реализующего созданный алгоритм распознавания, представлен на рисунке 2. Результат реализованного и распознанного изображения выводится в отдельном окне, найденное лицо обводится ограничивающим прямоугольником и подписывается распознанным из базы именем. Созданный алгоритм способен распознавать лица вне зависимости есть ли на лице маска или нет. Так же на экране приводится информация о наличии маски на распознанном лице и о общем количестве найденных на изображении лиц, по умолчанию выбирается лицо с самой большой площадью ограничивающего треугольника. Следующим шагом было получение координат прямоугольника, ограничивающего местоположение лица, из черно-белого изображения. Как упоминалось выше, для выделения лица, используется алгоритм HOG.

Так как целевым применением алгоритма является распознавание людей, входящих в здание, то скорость изменения картинки будет невысокой. Обработать кадры 30 раз в секунду не имеет смысла, поэтому ограничимся обработкой одного кадра в секунду, что позволит нам ещё больше оптимизировать алгоритм.

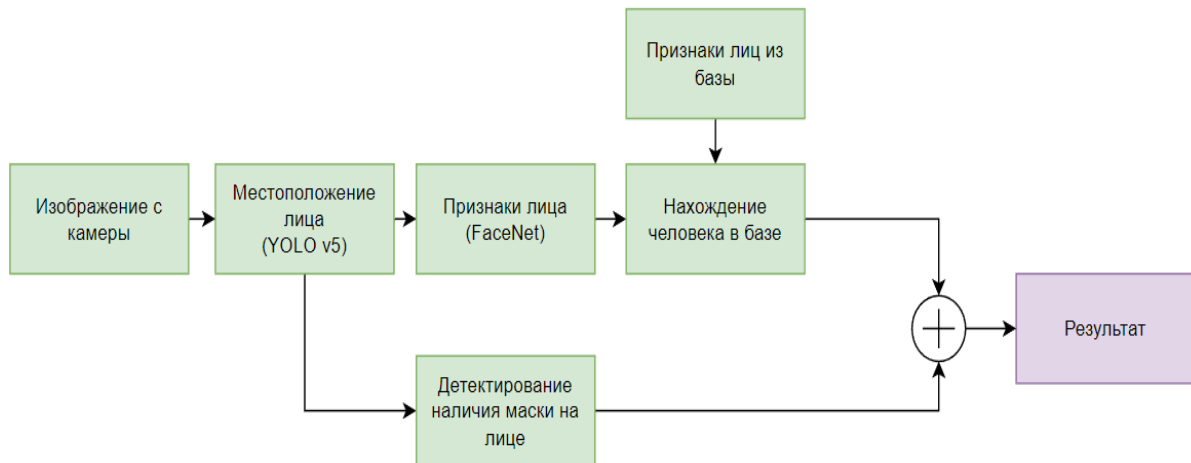


Рисунок 1 – Структурная схема работы алгоритма распознавания лиц людей при наличии маски на лице

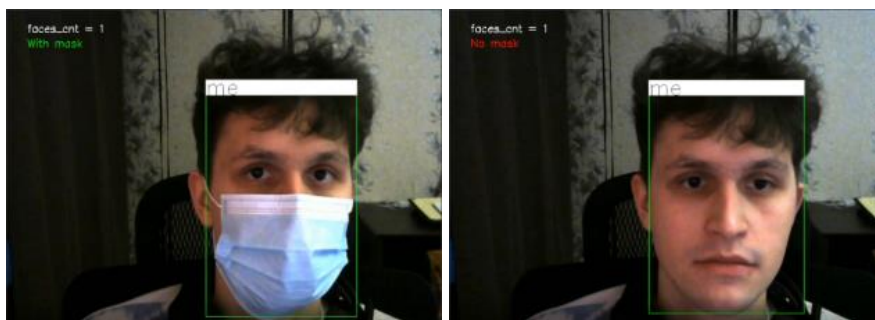


Рисунок 2 – Пример работы программного приложения, реализующего созданный алгоритм распознавания

После получения координат лиц, возвращаем изображение в исходное разрешение, увеличивая на 25% и используем их для выделения интересующей нас области, но уже на цветном изображении. Область с распознанным лицом передаем в сверточную сеть, для получения вектора признаков. В данном подходе используется, предобученная на классификацию лиц, архитектура ResNet34, в этом случае, сеть на последних слоях будет выделять абстрактные признаки, трудно интерпретируемые для человека, однако весьма информативные для задачи распознавания.

Таким образом, в результате работы разработаны алгоритм и программное приложение для распознавания лиц людей при наличии маски на лице, основанное на нейронных сетях, обеспечивающее устойчивость к различного рода помехам (очки, маска, плохое позиционирование лица и т.п.). Проведены экспериментальные исследования разработанного приложения для распознавания в реальном масштабе времени лиц людей, входящих в здание Исследования показали хорошую эффективность работы системы и время распознавания составило менее 0.5 с.

#### Список литературы

1. Viola, Paul & Jones, Michael. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. IEEE Conf Comput Vis Pattern Recognit. 2001. – 1. I-511. 10.1109/CVPR.2001.990517.
2. Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, Ali Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. 2016. P.779-788. 10.1109/CVPR.2016.91.
3. Ross Girshick, Microsoft Research. Fast R-CNN, 2015. 10.1109/ICCV.2015.169.

## АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В докладе рассматриваются архитектурные решения и основные способы оптимизации параметров беспроводных сенсорных сетей. Анализируются требования к параметрам сетей и предлагаются подходы к обеспечению качества обслуживания в сенсорных сетях.

Пространственно распределенная сенсорная сеть, предназначенная для сбора и обработки информации, поступающей от устройств интернета вещей, состоит из нескольких датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканала. В таких сетях реализуются процессы самоорганизации: клиентские устройства соединяются, маршрутизируют и передают трафик по ходу своей работы.

*Кластеризация.* Одним из перспективных подходов к оптимизации процессов сбора и передачи данных в сенсорных сетях является кластеризация. Главной задачей в данном подходе является оптимальный выбор головных узлов, та как на них ложится задача передачи трафика от остальных узлов под сети.

Очевидно, что узел, выбранный головным в момент времени  $t_1$  может передать свои полномочия другому сенсору, который в данный момент отвечает какой-либо метрике. В качестве этой метрики можно использовать запас батареи. На этом работает механизм LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) — один из самых распространенных вариантов выбора головных узлов. Данный алгоритм выполняет выбор сенсора на роль головного узла путём вероятностного моделирования, а после производит смену на основе динамики использования энергоресурсов.

Однако, LEACH не решает вопросов оптимальной зоны покрытия. Известны различные подходы к построению алгоритмов выбора головных узлов (см., например, [1,2]), в том числе основанные на нечеткой логике, нейросетевых алгоритмах, эвристических алгоритмах, таких как алгоритм роя пчел и др. Очевидно, что разработка алгоритма выбора головного узла, который обеспечивает оптимальное время работы сети в целом, вкупе с оптимальным покрытием местности – один из приоритетов в данном поле деятельности.

*Маршрутизация.* Основное внимание в проектировании сенсорной сети уделяется протоколу маршрутизации. Основная задача протоколов сетевого уровня – обеспечить надёжную передачу пакетов при минимальных затратах энергии сети и равномерном использовании всех узлов. Среди протоколов маршрутизации можно выделить такие классы протоколов, как протоколы с множественными маршрутами (multipath based – Directed Diffusion), протоколы на основе запросов (query based – Rumour, ACQUIRE), на основе переговоров (negotiation based – SPIN), кластерные протоколы (LEACH, TEEN, APTEEN), протоколы с обеспечением качества обслуживания (QoS based – SPEED) и другие [3].

Одним из перспективных направлений исследований является разработка алгоритмов маршрутизации с учетом современных требований к передаче данных, в частности, к работе с мультимедийной информацией, а также с учетом отказоустойчивости.

*Качество обслуживания.* Качество обслуживания (Quality of service – QoS) вводится в сетях для определения способности сети соответствовать заданным требованиям и характеристикам. Качество обслуживания определяет, может ли сеть предоставить необходимый сервис при передаче данных при заданных условиях. В классических сетях для обеспечения качества обслуживания используются такие модели управления

траффиком, как Differentiated Services, Integrated Services и т.п. Основными задачами качества обслуживания в классических сетях являются классификация трафика и назначение ему соответствующего приоритета, построение очередей пакетов и управление перегрузками при переполнении очередей (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CBWFQ?).

В отличие от классических сетей беспроводные сенсорные сети предоставляют сервис не только по передаче данных, но также и по сбору и их обработке. Соответственно качество обслуживания в беспроводных сенсорных сетях и его показатели также будут отличаться от классического.

Выделим особенности, характерные для беспроводных сенсорных сетей, определяемые условиями их функционирования, которые влияют на определение качества обслуживания в сенсорных сетях: эффективное использование ограниченных ресурсов (вычислительные возможности, емкость буфера, мощность передачи, время функционирования и т.п.), устойчивость к изменениям топологии, способность передавать различные типы трафика, мобильность (для некоторых приложений узлы сенсорной сети не устанавливаются статично, а могут изменять своё местоположение, что вносит дополнительные сложности при маршрутизации, при определении координат и т.п.).

Особенностями беспроводных сенсорных сетей являются также модели и характер сбора данных. Беспроводная сенсорная сеть может использовать одну из трёх моделей передачи данных: узлы передают данные на базовую станцию с определённым периодом; станция сама инициирует передачу данных, запрашивая определённый узел или группу узлов об их состоянии; узел посылает пакет данных при определённом событии. Как правило в беспроводных сенсорных сетях данные, полученные от каждого отдельно взятого узла, не играют большой роли. Обычно данные принимаются с нескольких датчиков, расположенных внутри некоторой области, и передаётся их усреднённое значение. Поскольку ресурсы, затрачиваемые на передачу данных сравнительно велики, предварительная обработка данных может быть осуществлена в самих узлах для уменьшения количества передаваемых данных. Для качества обслуживания при сборе информации с региона гарантия доставки отдельно взятого пакета имеет не столь высокое значение.

Следует разделять качество обслуживания во всей сенсорной сети и в отдельном узле. В первом случае качество обслуживания относится к решаемой задаче и состоит из показателей, существенных для пользователя с точки зрения потребления предоставляемого сервиса. Во втором случае речь идёт о конкретном трафике, поступающим от узла к узлу и о показателях, характеризующих этот процесс, а также об аппаратных характеристиках узлов, таких как погрешность измерения, радиус действия и т.д.

Выделим критерии, относящиеся к передаче данным в беспроводных сенсорных сетях, по которым можно оценивать качество обслуживания [4]:

Задержка. Говоря о задержке в беспроводных сенсорных сетях необходимо уточнить, какая модель передачи данных используется в сети. Задержка в беспроводных сенсорных сетях зависит от времени передачи и обработки данных на узлах, от алгоритма маршрутизации и механизма доступа к среде. Требования, предъявляемые к качеству обслуживания конкретной сенсорной сети зависят от класса задач, для которого эта сеть предназначена.

Пропускная способность. Пропускная способность сети определяет количество данных, которые могут быть переданы в единицу времени и измеряется в битах в секунду. Как и задержка, скорость передачи зависит от выбора маршрута, от ресурсов отдельных датчиков и сети в целом. Пропускная способность выражается через количество пакетов, которые узел способен обработать за единицу времени.

Время жизни сети. В качестве одного из параметров качества обслуживания для беспроводных сенсорных сетей следует выделить время, в течение которого сеть сможет обеспечивать передачу данных. Поскольку время работы датчиков ограничено, то

необходимо минимизировать затраты при установке сети, обработке и особенно при передаче данных.

Покрываемость заданной области. Качество обслуживания беспроводной сенсорной сети также оценивается относительно того, какая часть области, с которой собираются данные или ведётся контроль, находится в радиусе действия сенсоров и таким образом насколько полной информацией может располагать система. Этот параметр может быть выражен в количестве  $n$  сенсоров, необходимых для покрытия области площадью  $S$  с минимально допустимым уровнем сигнала.

Устойчивость к изменению топологии. Количественно эта характеристика может выражаться во времени, прошедшем с момента изменения топологии сети до восстановления её функционирования. На характеристику устойчивости в первую очередь влияет то, как организована маршрутизация в сети, а также как узлы сети получают информацию друг о друге.

Параметры качества обслуживания зачастую связаны между собой. Так, увеличивая пропускную способность сети за счёт выбора кратчайшего маршрута между узлом и базовой станцией уменьшается время жизни сети, т.к. в передаче будут задействованы одни и те же узлы. И наоборот, увеличивая надёжность передачи за счёт выбора синхронизированного протокола канального уровня, увеличиваются задержки, возникающие при ожидании узлом своей очереди. Для того, чтобы определить, какие параметры качества обслуживания являются существенными в каждой конкретной задаче, необходимо выделить классы задач беспроводных сенсорных сетей и определить, какие показатели являются важными для них.

Обеспечение качества обслуживания зависит от особенностей протокола на каждом уровне сетевой модели. На физическом уровне качество обслуживания зависит от уровня шума, способа кодировки и др. На канальном уровне на него влияет время доступа к среде, а также надёжность доставки пакетов. В зависимости от реализации алгоритма маршрутизации могут изменяться расход энергии сети, задержки и скорость доставки сообщений.

Таким образом, оптимизацию параметров беспроводной сенсорной сети предлагается рассматривать как комплексную многокритериальную задачу. Примером реализации такого подхода является методика оптимального размещения узлов и маршрутизации в сенсорной сети, разработанная в [5].

#### Список литературы

1. Han Z. A Load-balancing Clustering Algorithm of WSN for Data Gathering / Han Zhang, Liang Li, Xin-fang Yan, Xiang Li. // IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011.
2. Татарникова Т.М. Алгоритм роя пчел выбора головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети / Т. М. Татарникова, Ф. Бимбетов, Е. В. Горина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 15-22
3. Singh S. K. Routing protocols in wireless sensor networks – a survey. / S. K. Singh, M. P. Singh, D. K. Singh // IJCSSES Vol. 1, No.2, November 2010.
4. Xia F. QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks / Feng Xia // Sensors. 2008. Vol. 8, No2.
5. Воротницкий Ю.И. Оптимальное размещение информационных ресурсов в мультисервисных маршрутизируемых компьютерных сетях / Ю.И. Воротницкий, К.С. Шпак // Веснік сувязі.-2017.-№1 (141). –С 52-55.



## АЛГОРИТМ ТСП-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ

Белорусский Государственный Университет, Минск, Республика Беларусь

В докладе обосновывается актуальность однонаправленной передачи данных по протоколу ТСП. Предлагается для обеспечения передачи данных через протокол ТСП необходимо использовать прокси-сервер, на котором специальное программное обеспечение принимает ТСП подключение, извлекает данные и однонаправленно передает их по протоколу UDP через оптическую гальваническую развязку в соответствии с разработанным алгоритмом.

Протокол ТСП [1] (Transmission Control Protocol) является одним из основных протоколов передачи данных в сетях. ТСП обеспечивает надежную и устойчивую передачу данных между компьютерами, поддерживая контроль над потоком данных и обеспечивая доставку пакетов в правильном порядке.

Актуальность ТСП взаимодействия в информационных системах обусловлена тем, что информационные системы являются сложными сетевыми структурами, состоящими из множества компонентов, которые должны взаимодействовать между собой. Примером такой системы может служить Интернет, в котором миллионы компьютеров и устройств взаимодействуют друг с другом, обмениваясь данными. ТСП обеспечивает надежную передачу данных между различными узлами сети, что является важным аспектом кодирования и передачи информации. Он предоставляет механизм проверки целостности данных, контроль ошибок и управление потоком данных [2]. Также ТСП обеспечивает эффективную передачу данных на больших расстояниях путем их разбиения на множество малых пакетов.

В современных информационных системах существует необходимость передавать различного рода информацию из одних информационных систем в другие. При использовании аппаратно-программных средств однонаправленной передачи данных решается вопрос безопасной передачи данных между информационными системами с разной степенью конфиденциальности. Многие информационные системы, например, критически важные объекты информатизации, передают данные с датчиков по протоколу ТСП, работа которого основывается на двунаправленном взаимодействии. Возникает необходимость в сборе информации и мониторинге ее источников с учетом необходимости обеспечения безопасной передачи данных (например, однонаправленной) и исключения потенциального вредоносного воздействия на источники критически важного объекта информатизации.

Однонаправленная передача данных предполагает, что устройство в компьютерных сетях может только передавать данные или только получать их. При этом устройство – источник данных может осуществлять их передачу одному или нескольким устройствам – приемникам, но последние не могут передавать данные источнику. Однонаправленная передача данных применяется для безопасной передачи информации, например, файлов, журналов событий, почтовых сообщений, промышленных протоколов, обновлений программного обеспечения [3]. Однако, в условиях однонаправленной передачи данных протокол ТСП напрямую работать не может. Требуемую функциональность аппаратно-программного средства однонаправленной передачи данных обеспечивает архитектурное решение [4], включающее 2 медиаконвертера, 2 прокси-сервера, оптический разветвитель (сплиттер). Прокси-сервер отправителя и прокси-сервер получателя обеспечивают однонаправленную передачу данных, работая на транспортном уровне UDP [5] модели OSI через медиаконвертеры.

Секция 2. Прикладные проблемы информатики

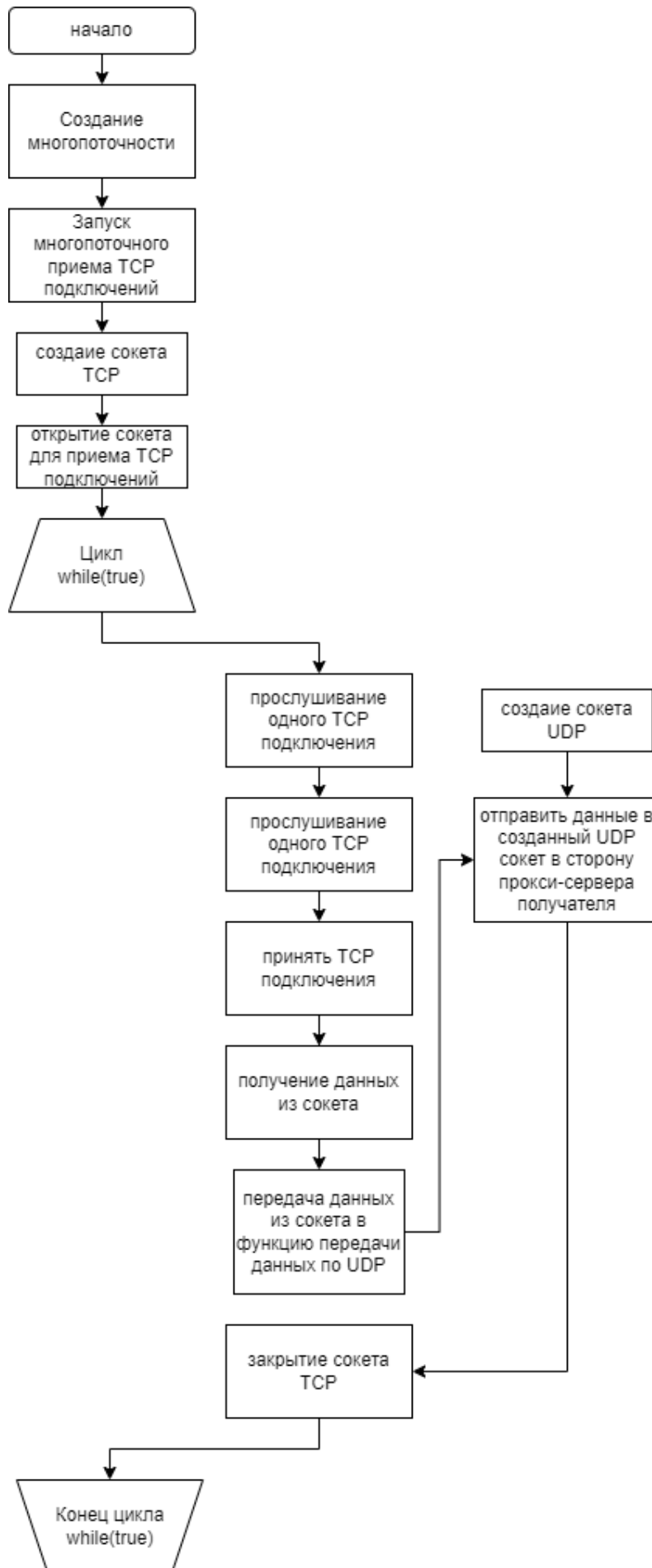


Рисунок 1 – Алгоритм однонаправленной передачи данных при работе с TCP протоколом.

Алгоритм однонаправленной передачи данных, реализованный на прокси-сервере отправителя (рисунок 1), включает следующие основные шаги:

1. Создание и запуск многопоточной работы для обеспечения приема одновременных TCP подключений от нескольких источников данных;
2. Создание TCP сокета [6] для приема подключений;
3. Установка параметров сокета, такие как адрес и порт прослушивания, размер буфера памяти с помощью функции `bind()`;
4. Запуск цикла обработки TCP подключений;
5. Разрешить серверу принимать соединения;
6. Ожидание клиентского подключения;
7. Прием данных от клиента размером с буфер памяти, определенного ранее;
8. Передача обработанных данных в функцию передачи по протоколу UDP;
9. Передача данных по протоколу UDP в предварительно созданный UDP сокет с параметрами, обеспечивающими передачу данных на прокси-сервер получателя;
10. Закрытие сокета TCP;
11. Окончание работы цикла обработки TCP подключений.

Предложенный алгоритм работы протокола TCP при однонаправленной передаче данных позволяет реализовать передачу данных в критически важных объектах информатизации [7].

Особенностями предложенного алгоритма являются:

1. Обеспечение информационной безопасности критически важного объекта информатизации и его элементов путем использования однонаправленной передачи данных;
2. Возможность реализации специального программного обеспечения с использованием различных языков программирования;
3. Использование прокси-серверов для реализации преобразования TCP в UDP и исключение необходимости доработки (перепрошивки) источников данных благодаря их работе на существующем стеке протоколов TCP/IP.

#### Список литературы

1. RFC 793: Transmission Control Protocol [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ietf.org/rfc/rfc0793.txt>. Дата доступа: 20.04.2021
2. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учеб. пособие для студ. вузов / В.Г. Олифер, Н.А.Олифер. 4-е изд. –М.; СПб.; Н. Новгород [и др.]: Питер, 2010. – 944 с.
3. Румас, Р. А., Воротницкий Ю.И. Анализ принципов работы сети при однонаправленной передаче данных в компьютерных сетях / Р. А. Румас, Ю.И. Воротницкий // Комплексная защита информации: материалы 26 науч.-практ. конф., Минск, 25–27 мая 2021 г. – Минск : Издатель Владимир Сивчиков, 2021. – С. 258–259.
4. Румас, Р. А., Воротницкий Ю.И. Архитектура средства однонаправленной передачи данных в компьютерных сетях / Р. А. Румас, Ю.И. Воротницкий // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2022): материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т. – Минск : БГУ, 2022. – С. 132–135.
5. RFC 768: User Datagram Protocol [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ietf.org/rfc/rfc0768.txt>. Дата доступа: 20.04.2021.
6. Socket – низкоуровневый сетевой интерфейс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.python.org/3/library/socket.html> Дата доступа: 01.11.2022
7. О некоторых мерах по совершенствованию защиты информации: Указ Президента Респ. Беларусь, 16 апр. 2013 г., № 196 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2013. – 1/14225.

## УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫМ ДИСПЛЕЕМ ЖЕСТАМИ ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В рамках данной работы разработана программа для взаимодействия человека с компьютером посредством жестов с помощью алгоритмов компьютерного зрения. При проектировании приложения выбран язык программирования Python, а также фреймворки компьютерного зрения OpenCV и машинного обучения MediaPipe.

Люди в значительной степени зависят от пяти органов чувств, чтобы интерпретировать происходящие события в окружающем нас мире. Широко известно, что с помощью зрения человек получает наибольший объем информации об окружающих предметах, причем без непосредственного взаимодействия с ними. Глаза, через которые мы видим и воспринимаем многое, помогают нам видеть путь, по которому мы идем, дорогу, по которой мы едем, и следить за любым возможным столкновением.

Однако первые же эксперименты выявили огромные трудности, связанные с наделением машины способностью видеть. Оказалось, что изображения одного и того же объекта, полученные в естественных условиях, настолько не похожи друг на друга, что их очень сложно распознать. Не так просто оказалось осуществлять и навигацию в пространстве по изображениям, поскольку в явном виде плоские изображения не содержат информацию о трехмерных характеристиках окружающих объектов и расстояниях до них. Попытки решить данные проблемы привели к возникновению новой области знаний – компьютерного зрения [1].

Компьютерное зрение – это молодая, перспективная и развивающаяся область робототехники. Хотя многие проекты в этой области находятся в стадии разработки, способность создавать машины, обрабатывающие визуальные данные, уже давно продемонстрирована в современном обществе. Эта способность использовалась для анализа штрих-кодов, были разработаны системы безопасности, сканирующие глаза человека и отпечатки пальцев для идентификации личности. Также проводились эксперименты по управлению автомобилями с помощью компьютера, обрабатывающего данные с видеокамер.

Исходя из перечисленного выше, была поставлена задача: разработать программу, благодаря которой человек мог бы взаимодействовать с компьютером посредством жестов рук. Разработка системы управления компьютером велась на языке программирования Python с использованием библиотеки OpenCV и ML фреймворка от компании Google – MediaPipe. Кратко расскажем, что и для чего применяется из использованных инструментов.

### **MediaPipe**

MediaPipe – это кроссплатформенная платформа машинного обучения с открытым исходным кодом, используемая для построения сложных и мультимодальных прикладных конвейеров машинного обучения. Его можно использовать для создания передовых моделей машинного обучения, таких как распознавание лиц, отслеживание несколькими руками, обнаружение объектов и отслеживание, и многие другие. MediaPipe в основном выступает в качестве посредника для обработки реализации моделей для систем, работающих на любой платформе, что помогает разработчику больше сосредоточиться на экспериментировании с моделями, чем на системе.

Одной из ключевых особенностей MediaPipe является его поддержка передовых моделей машинного обучения. Модели машинного обучения – это алгоритмы, которые могут извлекать уроки из данных и делать прогнозы на основе этих данных. MediaPipe включает в себя ряд предварительно обученных моделей машинного обучения, которые можно использовать для таких задач, как обнаружение объектов, распознавание лиц и оценка позы. Эти

модели отличаются высокой точностью и могут выполнять эти задачи в режиме реального времени, что делает их идеальными для использования в мультимедийных приложениях.

### OpenCV

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) – это открытая библиотека для работы с алгоритмами компьютерного зрения, машинным обучением и обработкой изображений. Написана на C++, но существует также для Python, JavaScript, Ruby и других языков программирования. Работает на Windows, Linux и MacOS, iOS и Android.

Также библиотека работает с машинным обучением — отраслью, которая обучает алгоритмы действовать тем или иным образом.

OpenCV применяется:

- в робототехнике – для ориентирования робота в пространстве, распознавания объектов и взаимодействия с ними;
- медицинских технологиях – для создания точных методов диагностики, например, 3D-визуализации органа при МРТ;

Применимо к поставленной задаче использовался фреймворк, который дал возможность отслеживания рук человека. Разработчики реализовали технологию точного отслеживания рук и пальцев с помощью машинного обучения (ML). Программа определяет 21 ключевую точку руки в 3D пространстве (высоту, длину и глубину) и на основании этих данных классифицирует жесты, которые показывает рука. Все это на основании всего одного фрейма видео, работает в реальном времени и масштабируется на несколько рук.

Решение состоит из 3 основных моделей, работающих вместе:

#### 1) Детектор ладони (BlazePalm):

- a) Принимает полное изображение из видео
- b) Возвращает ориентированный bounding box (ограничивающая рамка)

#### 2) Модель для определения ключевых точек на руке:

- a) Принимает обрезанную картинку руки;
- b) Возвращает 21 ключевую точку руки в 3D пространстве, как показано на рисунке 1

+ показатель уверенности

#### 3) Алгоритм распознавания жестов

- a) Принимает ключевые точки руки;
- b) Возвращает название жеста, который показывает рука [2].

На рисунке 1 представлены ключевые точки руки.

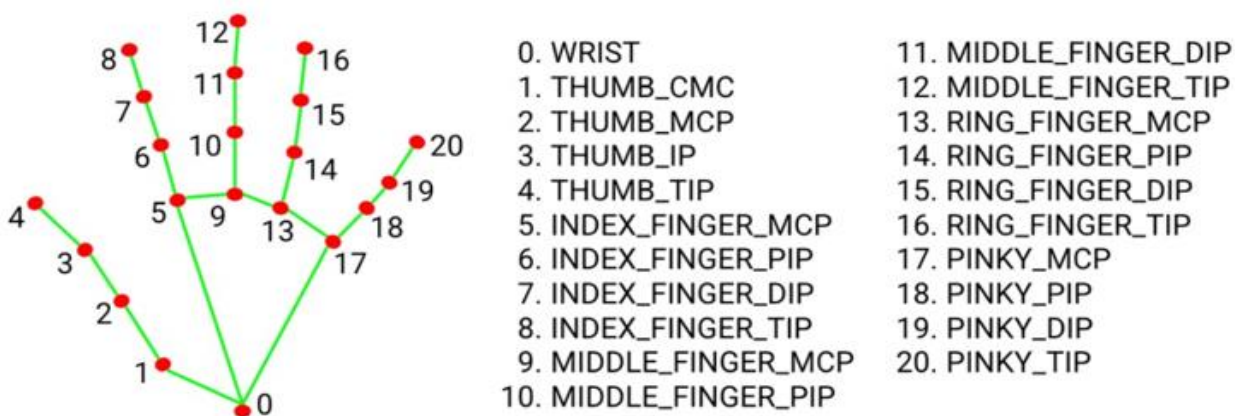


Рисунок 1 – Ключевые точки руки

Комплект моделей ручных ориентиров содержит модель обнаружения ладоней и модель обнаружения ручных ориентиров. Модель обнаружения ладоней находит руки на входном изображении, а модель обнаружения ориентиров рук идентифицирует конкретные ориентиры рук на обрезанном изображении руки, определяемом моделью обнаружения ладоней.

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

Поскольку запуск модели обнаружения ладоней занимает много времени в режиме воспроизведения видео или прямой трансляции, используется ограничивающая рамка, определенная моделью ориентиров рук в одном кадре, чтобы локализовать область рук для последующих кадров. Модель обнаружения ладоней запускается повторно только в том случае, если модель ручных ориентиров больше не определяет присутствие рук или не может отслеживать руки в кадре.

С помощью описанных выше библиотек и фреймворков была разработана программа со следующим функционалом и интерфейсом, представленном на рисунке 2.

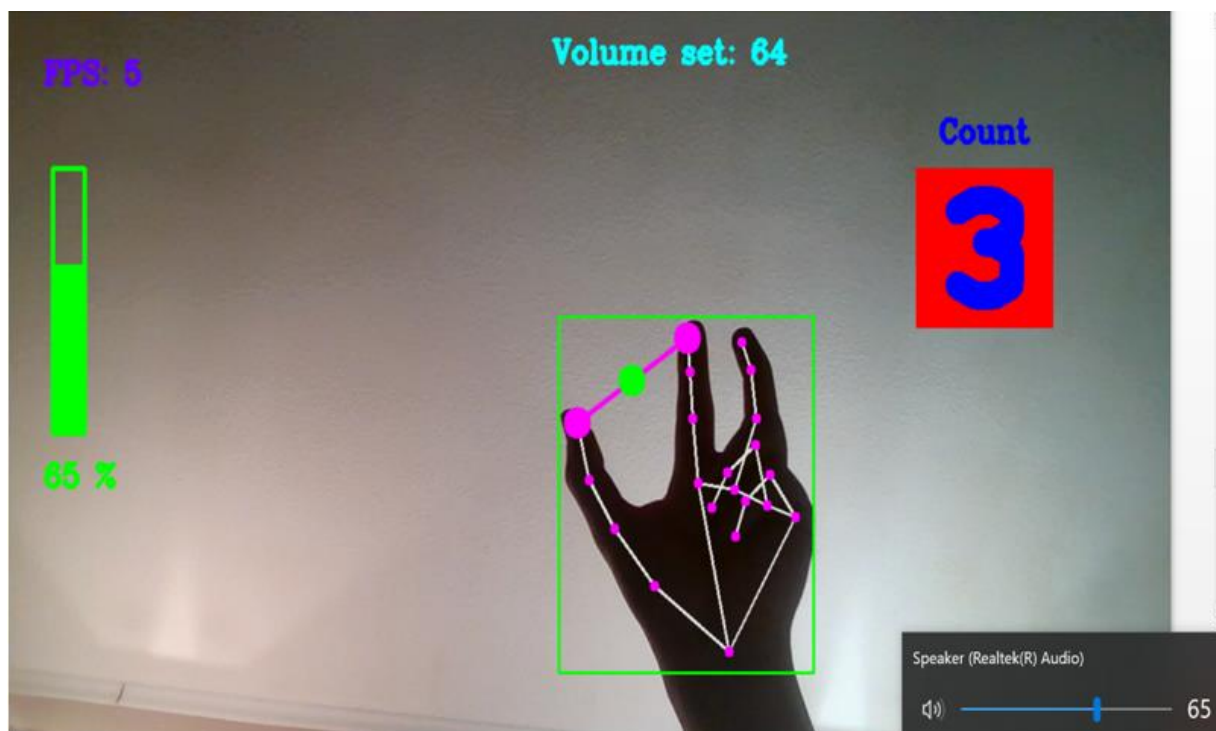


Рисунок 2 – Интерфейс разработанного приложения

1. Нахождение и отображение 21 ключевой точки руки в пространстве в режиме реального времени.
2. Подсчёт количества пальцев, которые присутствуют на изображении руки как показано на рисунке.
3. Изменение громкости компьютера посредством считывания расстояния между большим и указательным пальцами руки.
4. Управление курсором мыши компьютером при помощи следования за указательным пальцем руки.
5. Имитация клика ЛКМ при совмещении большого и указательного пальцев руки.

Распознавание жестов – одна из важнейших задач достижения взаимопонимания между человеком и компьютером. Руки и тело человека являются естественными манипуляторами и обладают большим числом степеней свободы, поэтому успешное решение задачи распознавания выполняемых ими жестов раскрывает перспективы для решения широкого круга прикладных задач.

### Список литературы

1. Machine Learning Mastery [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://machinelearningmastery.com/what-is-computer-vision/>. – Дата доступа: 10.04.2023.
2. MediaPipe [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Hand landmarks detection guide | MediaPipe | Google Developers. – Дата доступа: 10.04.2023.

## БЫТОВОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СЧЕТЧИК ВОДЫ И ТЕПЛА С БЕСПРОВОДНЫМ КАНАЛОМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета

Описаны основные подходы, реализованные при проектировании ультразвуковых счетчиков воды и тепла с батарейным питанием, обладающих большим динамическим диапазоном измерения и имеющих встроенный беспроводной канал передачи данных по технологии LoRa. Обоснованы основные технические и алгоритмические решения, обеспечивающие практическую реализацию счетчиков.

Принцип измерения ультразвуковым счетчиком объема воды, прошедшей по трубопроводу, заключается в измерении средней скорости потока воды. Умножение скорости потока на площадь поперечного сечения  $D$  измерительного участка 1 (рисунок 1) счетчика в трубопроводе позволяет получить значение текущего расхода воды. Скорость потока воды в ультразвуковом расходомере определяется по разности времен распространения ультразвукового сигнала, излучаемого поочередно по потоку и против потока воды, от излучающего пьезоэлектрического преобразователя к приемному преобразователю 3 (рисунок 1).

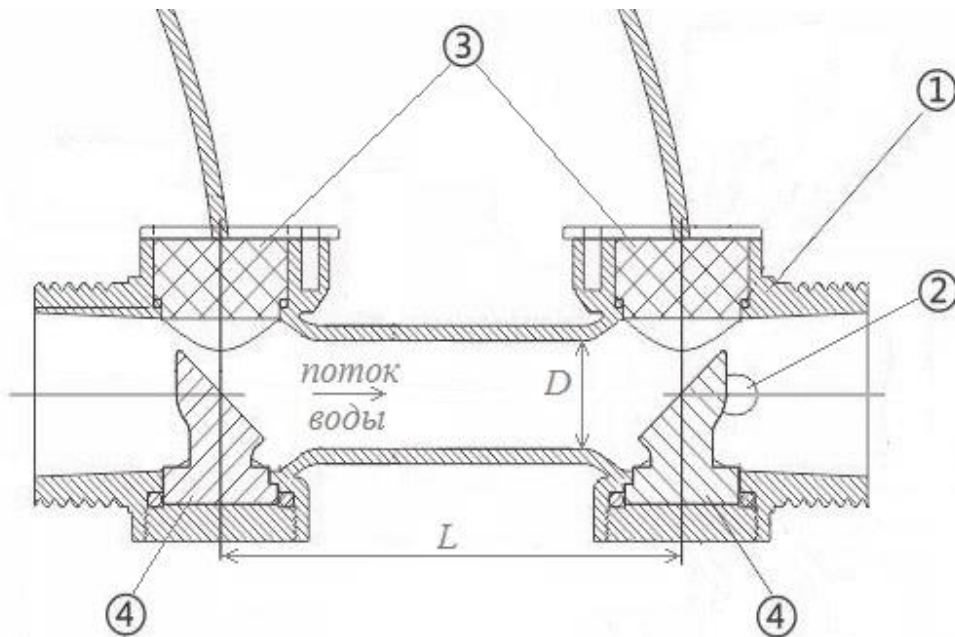


Рисунок 1 – Схема измерительного участка ультразвукового счетчика

Выражение для скорости потока воды  $u$  имеет вид [1]

$$u = \frac{L_p^2 * T_p}{2 * T_1 * T_2 * L * \cos \varphi} \quad (1)$$

где  $L_p$  – длина пути ультразвукового сигнала между излучающими поверхностями пьезоэлектрических преобразователей;  $L$  – длина пути, проходимого ультразвуком в измерительном участке;  $\cos \varphi$  – косинус угла между направлением потока и направлением излучения,  $T_p$  разность времен распространения ультразвукового сигнала по направлению потока  $T_1$  и против потока  $T_2$ .

Точность и диапазон измерения скорости потока зависят, главным образом, от длины пути  $L$ , на котором проводятся измерения, разрешающей способности измерителя временных интервалов и отношения сигнал/шум в канале измерения. При проектировании ультразвуковых расходомеров существуют определенные ограничения на увеличение длины измерительного участка, связанные, в основном, с конструктивными ограничениями и потребительскими требованиями. Поэтому применение зеркал 4 (рисунок 1) позволяет без изменения габаритных размеров измерительного участка получить максимальное взаимодействие ультразвукового сигнала с потоком воды ( $\cos\varphi=1$ ). Очевидно, что при малых значениях диаметра  $D$  вариант с отраженным лучом позволяет при той же скорости потока  $u$  получать большие значения  $T_p$ , что обеспечивает расширение динамического диапазона измерений в область малых расходов. Кроме того, встроенный платиновый датчик температуры 2 (рисунок 1) позволяет проводить измерения расхода тепловой энергии, переносимой потоком воды.

Повышение разрешающей способности расходомера требует построения более сложных измерительных схем и, в условиях переменных и флуктуирующих потоков, требует проведения большого числа измерений в единицу времени [3]. В то же время, применение батарейного питания накладывает ограничения на объем измерительных и вычислительных процедур, связанные с необходимостью обеспечить требуемую продолжительность работы без замены батареи.

Для реализации малопотребляющего расходомера-счетчика воды с большим диапазоном измерения и высокой точностью была разработана схема измерения временных интервалов методом интерполяции на специализированной микросхеме для измерения характеристик потоков MAX35101 фирмы MAXIM (Analog Devices). Микроконтроллер обеспечивает сверхнизкое потребление питания (единицы микроампер) в моменты времени между измерениями, а применение микроконтроллера с большей разрядностью позволяет снизить время на выполнение вычислений. Импульсный режим работы с динамической регулировкой приемно-излучающего тракта позволяет получить малый средний ток потребления и обеспечить возможность работы от низковольтной батареи питания в течение длительного периода времени.

Особенностью выполнения измерений с помощью вышеупомянутого комплекта в связке с микроконтроллером, имеющим развитую аналоговую периферию (компараторы, АЦП и ЦАП) является, во-первых, возможность подстройки зондирующего сигнала и параметров схемы приемника в зависимости от условий измерений, во-вторых, проводить зондирование среды сигналом в виде регулируемой последовательности импульсов и, наконец, обеспечивается возможность измерения задержки приема зондирующего сигнала по нескольким периодам с высоким разрешением по времени. Все это, в совокупности, позволило разработать тракт измерения временных интервалов в диапазоне до 8 мс с разрешающей способностью 15 пс при среднем токе потребления, не превышающем 100 мкА.

Чтобы обеспечить измерение изменяющихся потоков при оптимальной частоте измерения и постоянной усреднения с минимальной нагрузкой на батарею был разработан и реализован алгоритм, обеспечивающий адаптивное изменение параметров измерений в зависимости от динамики потока («динамическое усреднение»). Суть алгоритма заключается в том, что при быстром изменении скорости потока воды соответственно увеличивается частота измерений и уменьшается постоянная усреднения таким образом, чтобы минимизировать отклонения измерений от среднего значения. При установившемся потоке параметры измерений возвращаются к исходным заданным значениям. Таким образом, счетчик обеспечивает хорошее отслеживание динамических процессов без существенного уменьшения ресурса источника питания.

Другой важный аспект, гарантирующий высокую точность и надежность работы счетчика обеспечивается введением обработки измеренных данных с коррекцией и отбраковкой недостоверных результатов («селекция измерений»). Критерием достоверности измерений служит величина отклонения измеряемых значений по двум измеряемым направлениям. При отклонении измеренного значения хотя бы по одному направлению заданной величины раз-



маха измерение по обоим направлениям «бракуется» и не участвует в дальнейших вычислениях. Многократное повторение «бракованных» измерений свидетельствует о неисправности канала измерения и формирует сигнал ошибки. В тоже время если отклонения не значительны, то возможна коррекция измерений так как результат измерений имеет избыточную информацию о времени распространения ультразвукового сигнала. Такой подход позволяет существенно увеличить стабильность измерений расхода воды поскольку среда содержит неоднородности в виде небольших пузырьков воздуха, которые оказывают влияние на распространение ультразвука.

Для беспроводной передачи данных в счетчике используется модуль LoRa-02 SX1278 433МГц, который подключен к микроконтроллеру прибора через порт SPI. Передача данных осуществляется через сетевой хаб, который является центральным узлом для считывания информации со смарт-приборов и передачи результатов на сетевой сервер. Беспроводная технология LoRa позволяет передавать информацию на большие расстояния, т.е. один сетевой хаб способен обслуживать смарт-приборы, расположенные в радиусе до 15 км.

Наличие в базовой комплектации счетчика канала беспроводной передачи позволяет непосредственно использовать счетчик в централизованных системах сбора данных. Реализация протокола обмена данными в соответствии с СТБ 2559-2019 [4] позволяет интегрировать счетчик в современные АСУ. Кроме того, текстовый формат данных JSON хорошо встраивается в сетевой протокол MQTT, работающий поверх TCP/IP и выполняющий передачу данных по принципу «издатель-подписчик». В результате счетчик может использоваться в качестве устройства «Умного дома» по технологии Интернета вещей (IoT), ориентированной на повышении эффективности обслуживания дома.

#### Список литературы

1. Методика выполнения измерений с помощью ультразвуковых преобразователей расхода: СТО Газпром 5.2-2005.- Москва: 2005 – 74 с.
2. Дедович Н.Н., Романов А.Ф., Чернобай И.А., Шестаков Л.В. Ультразвуковые расходомеры газа с автономным питанием // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния / Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 40-летию НИИ ПФП им.А.Н.Севченко БГУ 28.02.2011 г. С. 98-99.
3. Дедович Н.Н., Романов А.Ф. Повышение точности и диапазона измерения расхода в бытовых ультразвуковых расходомерах газа с батарейным питанием // «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» - Материалы Международной научно-практической конференции 27-28 февраля 2013 года, Минск, 2013. С.144-146.
4. Оборудование электросвязи дистанционного съема. Обмен данными верхнего уровня: СТБ 2559-2019 – Введ. 01.01.2020. – Минск: Госстандарт, 2019. – 15 с.

УДК 577.21, 57.081.23

Дигрис А. В., Вычик П. В., Дувалов Е. И., Скакун В. В., Николайчик Е. А.

## **BasRegDB – БАЗА ДАННЫХ И НАБОР ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАБОТЫ С РЕГУЛЯТОРНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ В БАКТЕРИАЛЬНЫХ ГЕНОМАХ**

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

В работе предложены инструменты для анализа регуляторной информации в бактериальных геномах, выполняющие аннотирование сайтов связывания отдельных транскрипционных факторов, а также классификацию транскрипционных факторов на основе скрытых марковских моделей, в том числе и собственной разработки. Инструменты доступны для использования через веб-интерфейс новой базы данных регуляторной информации BasRegDB. Работоспособность и эффективность инструментов подтверждена на примере анализа геномных последовательностей бактерий разных таксономических групп.

**Введение.** На современном этапе развития геномных технологий актуальной задачей является обработка больших объемов информации, получаемой в ходе геномного секвенирования. При исследовании геномов бактерий важную роль играет их максимально полная функциональная аннотация, состоящая в идентификации кодирующих последовательностей, регуляторных элементов, рРНК и тРНК, транспозонов и других функциональных единиц генома. Регуляторные элементы при экспрессии генома живого организма позволяют ему реагировать на стимулы внешней среды и поддерживать клеточный гомеостаз. Основным механизмом такой адаптивности является дифференциальная экспрессия генов. Возможность активировать или репрессировать транскрипцию конкретных групп генов реализуется преимущественно путем взаимодействия с их регуляторными областями особого класса ДНК-связывающих белков – транскрипционных факторов (ТФ). Восстановление информации о регуляторных сетях в бактериальных геномах путем идентификации кодируемых ТФ, поиска их сайтов связывания и контролируемых транскрипционных единиц, определение условий, являющихся внешним сигналом для изменения экспрессии, – все это является основной предпосылкой для решения многих фундаментальных и прикладных задач биотехнологии, и делает важным создание инструментов для полноценной аннотации регуляторной информации. Существующие программы-аннотаторы не используют информацию о регуляторных мотивах и сайтах связывания, накопленную в общедоступных базах данных. Более того, большинство ресурсов не предлагает иных подходов к применению этой информации для новых геномов, кроме как принципа достаточного уровня гомологии аминокислотной последовательности транскрипционного регулятора. Данные факты делают особенно актуальной задачу по созданию инструмента для аннотации регуляторной информации, особенно в контексте более точного критерия применимости известных регуляторных мотивов в новых геномах.

В ходе нашей работы были систематизированы сведения об известных сайтах связывания и регуляторных мотивах, депонированных в таких базах данных как RegulonDB, CollecTF, RegPrecise, Prodoric2. В результате были получены новые регуляторные мотивы высокого качества на основе доступной экспериментально информации о сайтах связывания и результатов работы de-novo конвейера программы SigmolD 1 для поиска регуляторных мотивов. Для удобства использования регуляторных мотивов ТФ реализована база данных BasRegDB [2, 3] и разрабатывается веб-портал для доступа к хранящейся в ней информации. Инструменты веб-портала способны выполнять аннотирование сайтов связывания определенных ТФ, идентификацию и классификацию ТФ в геноме на основе скрытых марковских моделей. Ключевой особенностью регуляторных мотивов BasRegDB является использование тега из критических аминокислотных остатков (CR-тег) – последовательности аминокислот, располагающихся в позициях ДНК-связывающего домена, которые определяют специфичность узнаваемой последовательности ДНК. Определение CR-тега возможно для ТФ в загружаемых пользователем геномах, что определяет возможные для использования регуля-

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

торные мотивы в базе данных. Работоспособность инструментов подтверждена при анализе бактериальных геномов разного размера и разных таксономических групп.

**Результаты.** Созданные инструменты для классификации ТФ, кодируемых в геноме, и аннотации сайтов связывания реализованы в виде конвейера, принимающего на вход геномный файл в формате GenBank и выполняющего ряд последовательных этапов его обработки.

Инструмент для классификации ТФ выполняет средствами Biopython 4 отбор всех последовательностей, размеченных в исходном геноме как кодирующие, генерируя файл с открытыми рамками считывания, транслированными в аминокислотную последовательность в формате FASTA. Далее этот файл обрабатывается инструментом hmmscan 5 с использованием библиотеки, описывающей типовые семейства ДНК-связывающих доменов. Результаты hmmscan фильтруются, для каждого ТФ определяется последовательность CR-тега на основании координат модели ДНК-связывающего домена, и выгружаются в формате JSON для последующей отправки и отображения на клиентской части веб-приложения (рисунок 1).

a)

TFs encoded in the Pve32_2022.07.gbk									
Protein ID ↑	Gene ↑↓	Locus Tag ↑↓	Critical Residue Tag ↑↓	Family ↑↓	Accession ↑↓	E-value ↑↓	Score ↑↓	Description ↑↓	
AVT56699.1	asnC	OA04_00020	YSPGTH	HTH_AsnC-type	PF13404.7	1.7e-15	49.3	DNA-binding transcriptional dual regulator	
AVT56705.1	qseB	OA04_00080	VNSAEVHHH	Trans_reg_C	PF00486.26	2e-23	75.0	two-component system response regulator	
AVT56712.1	rbsR	OA04_00150	VATVSINSDTLNQ	HTH_LacI	SM00354	7.1e-29	92.3	transcriptional repressor RbsR	
AVT56723.1	ntrC	OA04_00330	GRNTTR	bEBP_DBD	YN006	1.6e-18	58.9	nitrogen regulation protein NR(I)	
AVT56741.1	-	OA04_00530	SPTHQPSQSR	HTH_18	PF12833.8	1.7e-22	72.2	AraC family transcriptional regulator	
AVT56752.1	-	OA04_00640	-	Sigma70_r2	PF04542.16	3.2e-13	42.0	ECF family RNA polymerase sigma factor	
AVT56763.1	relB1	OA04_00750	VSKKLR	PhdYeFM_antitox	PF02604.18	5.2e-08	25.3	antitoxin	
AVT56769.1	-	OA04_00810	LASLSTKRPA	XRE_superfamily	SM00530	5.1e-08	25.5	XRE family transcriptional regulator, putative antitoxin component of HipA like toxin-antitoxin module	
AVT56770.1	-	OA04_00820	YTSQSSSYR	HTH_1	PF00126.25	2.8e-17	55.1	LysR family transcriptional regulator	

Total TF count: 339 [Download as TSV file](#)

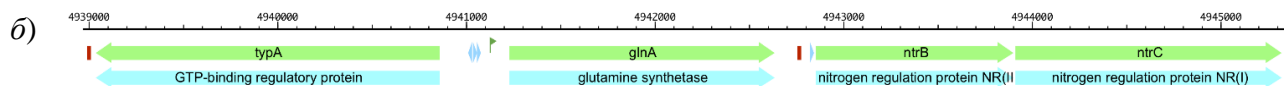


Рисунок 1 – Результаты классификации транскрипционных факторов (а) для генома *Pectobacterium versatile* 3-2 и аннотации (б) сайтов связывания NtrC. Сайты связывания добавлены с помощью инструмента аннотации и визуализированы (голубые треугольники) в программе SigmaID 6 (в приведенном фрагменте генома видно 4 из 22 аннотированных сайтов).

Инструмент для аннотации сайтов связывания помимо геномного файла принимает на вход информацию о профиле регуляторного мотива, который необходимо использовать. На базе входных данных выполняется сканирование с выбранной моделью посредством nhmmsearch 5 и последующая фильтрация результатов на основании пороговых значений модели. Идентифицированные сайты аннотируются в формате GenBank и предоставляются пользователю через интерфейс клиентской части веб-приложения.

Инструменты обработки бактериальных геномов реализованы в рамках веб-приложения, обеспечивающего удаленную работу пользователей с базой данных бактериальных регуляторных последовательностей BacRegDB [2, 3]. Разработанное веб-приложение включает серверную часть, представляющую собой RESTful Spring Boot приложение, написанное на Java и клиентскую часть, разработанную с использованием фреймворка ReactJS 7. Обмен данными между серверной и клиентской частями приложения выполняется в формате JSON с использованием http запросов, что обеспечивает возможность относительно независимой разработки отдельных частей приложения. Построение клиентской части в виде наборо-

ра React компонент упрощает возможность расширения в перспективе перечня инструментов для анализа данных.

Пользовательский интерфейс вышеуказанного приложения включает страницу, позволяющую выбрать для обработки файл в формате GenBank, содержащий базовую разметку кодирующих последовательностей. При использовании инструмента для аннотации сайтов связывания необходимо выбрать ТФ из доступных в базе данных BacRegDB. Для упрощения поиска требуемого ТФ реализована фильтрация по семейству транскрипционных факторов и/или по их присутствию в загруженном пользователем файле. Непосредственная обработка предоставленного пользователем генома выполняется серверной частью веб-приложения. Результаты работы инструментов аннотации и классификации отображаются средствами разработанного веб-интерфейса в текстовом и табличном виде, соответственно. Дополнительно пользователю доступны для скачивания файл в формате GenBank с результатами аннотации, а также .tsv файл с результатами работы классификатора.

Разработанный набор средств анализа регуляторной информации был использован для классификации ТФ в геноме *Pectobacterium versatile* 3-2 и последующей аннотации сайтов связывания NtrC. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

**Заключение.** Разработаны инструменты для классификации бактериальных транскрипционных факторов и аннотации сайтов связывания выбранного фактора в бактериальных геномах. Отличительной чертой предложенных инструментов является использование CR-тегов для ассоциации известных регуляторных мотивов с закодированными в геноме ТФ, что позволяет переносить регуляторную информацию в соответствии с более строгим критерием, чем уровень гомологии последовательностей ДНК-связывающих доменов. Программная реализация разработанных инструментов в рамках веб-приложения в сочетании с базой данных BacRegDB значительно повышает их доступность для практического использования. Созданный инструментарий применим для работы с геномами бактерий, имеющих базовую разметку кодирующих последовательностей и доступен по адресу <http://bacregdb.bsu.by/tools>.

#### Список литературы

1. Nikolaichik, Y. New approach to genome-wide automated inference of bacterial transcription factor binding sites / Y. Nikolaichik, P. Vychik // Abstracts of the XII Intern. Multiconf. "Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology". – Novosibirsk, 2020. – P. 75–76.
2. Скакун, В. В. Разработка базы данных мотивов регуляции транскрипции у бактерий / В. В. Скакун, Е. А. Николайчик // Информатика 19 (1). 2022. – С. 59–71.
3. Дигрис, А. В. Веб-приложение для доступа к базе данных мотивов регуляции транскрипции у бактерий / А. В. Дигрис, Е. И. Дувалов, В. В. Скакун, Е. А. Николайчик. // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2020): материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апр. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Скакун (отв. ред.) [и др.]. – Минск : РИВШ, 2022. С. 273-276.
4. Cock, P. J. et al., 2009. Biopython: freely available Python tools for computational molecular biology and bioinformatics / P. J. Cock [et al.] // Bioinformatics. – 2009. – Vol. 25(11). – P.1422–1423.
5. Finn, R.D. HMMER web server: interactive sequence similarity searching / R. D. Finn, J. Clements, S. R. Eddy // Nucleic Acids Research. – 2011. – Vol. 39, № suppl. – P. W29-W37.
6. Nikolaichik, Y. Sigmoid: a user-friendly tool for improving bacterial genome annotation through analysis of transcription control signals / Y. Nikolaichik, A.U. Damienikan // PeerJ. – 2016. – Vol. 4: e2056.
7. Порселло, Е. React: современные шаблоны для разработки приложений / Е. Порселло, А. Бэнкс. – 2<sup>е</sup> изд. – Питер. – 2021. – 320 с.

## АНАЛИЗ ФИШИНГОВЫХ СООБЩЕНИЙ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В работе рассматриваются проблемы мошенничества с помощью фишинга и способы защиты от него. Предложен алгоритм для определения фишинговых сообщений методами машинного обучения, основанный на ансамбле классификаторов. Один из классификаторов анализирует ссылки, а другой – текст письма. Комбинация двух классификаторов позволяет с максимальной эффективностью отличать фишинговые сообщения от обычных.

В прошлом информация считалась сферой бюрократической работы и ограниченным инструментом для принятия решений. Сегодня информацию рассматривают как один из основных ресурсов развития общества, а информационные системы и технологии как средство повышения производительности и эффективности работы людей.

С развитием информационных технологий растет и количество киберпреступлений. Большинство кибератак совершается киберпреступниками или хакерами с целью получения финансовой прибыли. Однако целью кибератак может быть и выведение компьютеров или сетей из строя – из личных, экономических или политических мотивов. В 2022 году эксперты SlashNext зафиксировали 255 млн фишинговых атак, что на 61% больше, чем в 2021 году. С 2019 года фишинг вырос более чем на 300 процентов [1].

Фишинг (англ. phishing, от *fishing* – рыбная ловля, выуживание и *password* – пароль) – вид интернет-мошенничества, цель которого – получить идентификационные данные пользователей [2].

Отличительными особенностями фишинга являются:

1. Общие обращения (дорогой клиент, уважаемый пользователь и т.д.)
2. Слова, побуждающие вас к импульсивным действиям, угрозы
3. Большое количество ссылок
4. Большое количество вложенных файлов
5. Особенная структура URL (точки вместо слешей, дополнительные слова в названиях)

В качестве решения в работе предлагается применение ансамбля классификаторов. Первый классификатор будет распознавать текст, а второй – разбирать ссылки. Результат работы двух классификаторов будет подаваться на третий, для принятия окончательного решения.

Также есть возможность создания базы данных с известными и зарезервированными именами отправителей, что тоже будет учитываться в окончательном решении. Это, с одной стороны, поможет учитывать тот факт, что некоторые официальные отправители делают рассылку, содержащую огромное количество ссылок и вложений, а с другой стороны это даст возможность добавлять каких-то отправителей «вручную» в список фишинговых. На рисунке 1 приведена предлагаемая схема классификации и принятия решения о фишинговом характере рассматриваемого сообщения.

Для реализации классификации URL был выбран алгоритм случайного леса [3], который показал лучшие результаты, чем MLP, SVC и KNN. Результат сравнения приведен в таблице 1.

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

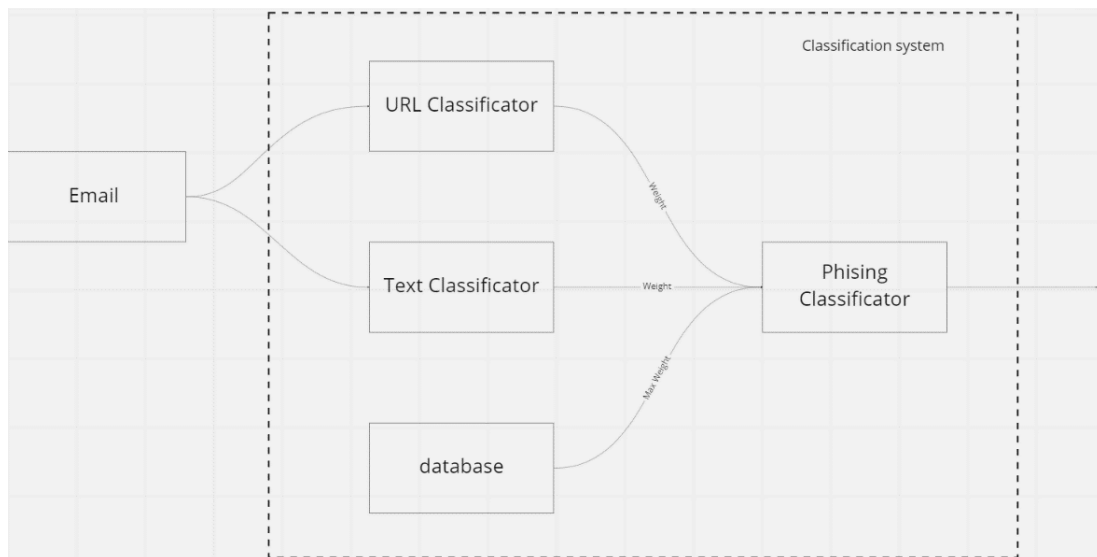


Рисунок 1 – Схема системы принятия решений

Таблица 1

Результаты работы моделей на датасете для анализа URL

Модель	Accuracy	Score		Precision/recall		
		Train	Test		prec	rec
Random forest	0.97	0.756625	0.756500	0	0.98	0.97
				1	0.97	0.98
MLP	0.97	0.501750	0.493000	0	0.98	0.97
				1	0.96	0.98
SVC	0.96	0.501750	0.493000	0	0.97	0.96
				1	0.96	0.97
KNN	0.95	0.547375	0.531500	0	0.96	0.94
				1	0.94	0.96

Путем перебора был получен следующий вариант конфигурации гиперпараметров, который показал лучший результат (рисунок 2).

```

randomForestClassifier = RandomForestClassifier (
    n_estimators = 25,
    criterion = "log_loss",
    max_depth = 10,
    min_samples_split = 2,
    max_features = "sqrt"
)
  
```

Рисунок 2 – Гиперпараметры классификатора

Результат работы классификатора представлен в таблице 2.

Результат работы классификатора

Random forest	0.98	Train	0.810125		prec	rec
		Test	0.815500	0	0.97	0.98
				1	0.98	0.97

## Результаты классификации

Для работы было выбрано Functional API, которое позволяет создавать более гибкие классификаторы, а также получать вывод с промежуточных слоев нейронной сети (рисунок 3).

```
inputData = keras.Input(shape = (input_dim, ))
step_x = layers.Embedding(input_dim=input_dim, output_dim=64, input_length=input_dim)(inputData)
step_x = layers.LSTM(128)(step_x)
step_x = layers.Dense(15, activation='sigmoid')(step_x)
intemediate_layer = layers.Dense(5)(step_x)
outputs = layers.Dense(1)(intemediate_layer)
```

Рисунок 3 – Слои классификатора

В качестве оптимизатора был выбран RMSprop, а в качестве функции потерь – binary cross entropy [5]. Модель тренировалась в две эпохи. В итоге получен результат  $\approx 99\%$  точности.

Для того, чтобы передать данные на третий классификатор, нужны не итоговые классы, а значения с внутреннего слоя. Создав еще одну модель и передав туда слои, с уже подобранными весами, получен вывод с промежуточного слоя (рисунок 4)

```
[ [-0.12311255  0.8070983  -0.20561759  1.4777794  -0.4213598 ]
  [-0.29825336  0.6255218  -0.05864905  1.3300586  -0.5277535 ]
  [ 0.05574946  0.94775915  -0.32396922  1.6031469  -0.31412137 ]
  ...
  [ 0.0997073  0.9698774  -0.34687632  1.6271651  -0.2884365 ]
  [-0.09812677  0.83260524  -0.22550572  1.510163  -0.40286952 ]
  [-0.7242879  0.12844914  0.35004365  0.9296422  -0.7574744 ] ]
```

Рисунок 4 – Значения с внутреннего слоя

Уловки мошенников становятся все более изощренными, и не все могут противостоять социальной инженерии, к которой прибегают фишеры. Для того, чтобы исключить человеческий фактор и влияние социальных инструментов на человека, хорошим решением может стать использование нейронных сетей в анализе и сортировке входящих сообщений. Данное решение может существенно снизить количество преступлений, совершаемых с помощью фишинговых сообщений.

## Список литературы

1. Сайт SlashNext [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.slashnext.com/blog/state-of-phishing-report-reveals-more-than-255-million-attacks-in-2022/> – Дата доступа: 10.04.2023
2. Что такое фишинг? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/knowledge/what-is-phishing/> – Дата доступа: 15.10.2022
3. Peter Flach, Machine learning the art and science of algorithms that make sense of data перевод с англ. ДМК Пресс, 2015
4. Датасеты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/> - Дата доступа: 10.2022
5. Шолле Франсуа, Глубокое обучение на Python, СПб.: Питер, 2018. — 400 с.: ил.

## **ПРИМЕНЕНИЕ КАРТЫ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОДЛИННОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе представлены экспериментальные исследования, связанные с разработкой программного приложения на основе корреляционной обработки цифровых изображений для построения карты корреляции для выбранной области изображений и решения такой задачи криминалистических исследований как анализ подлинности и выявление фальсификации изображений.

Для решения задачи повышения точности измерения информационных параметров объектов по оптическим цифровым изображениям необходимо использовать новые эффективные методики обработки и корреляционного анализа изображений. Корреляционное распознавание изображений является одним из наиболее перспективных и широко применяемых инструментов для идентификации, поиска и локализации объектов относительно сложных форм при проведении экспертных исследований. Использование специализированных программных приложений с применением функций корреляционной обработки (КФ) цифровых изображений объектов экспертного исследования позволит при проведении криминалистических экспертиз расширить число применяемых методов и средств измерений, оптимизировать процесс измерений, и тем самым повысить качество, достоверность и репрезентативность проводимых исследований [1].

Корреляционные методы обработки изображений обеспечивают нахождение пиксельных соответствий путем сравнения профилей яркости в окрестности потенциально соответствующих точек разных изображений объекта. Обработка изображений осуществляется с помощью различных функций, реализующих корреляционный анализ. К таким функциям можно отнести нормированную кросс-корреляционную функцию (англ. – Normalized cross correlation, NCC) [2]; сумму абсолютных значений разностей (англ. – Sum of Absolute Differences, SAD) [3]; сумму квадратов разностей (англ. – Sum of Squared Differences, SSD) [3]; нормированную сумму квадратов разностей (англ. – Normalized SSD, NSSD) [2]. Функции, реализующие корреляционную обработку, ZSAD и ZSSD [2] являются модификациями функций SAD и SSD, при этом в вычислениях учитываются средние интенсивности пиксельных значений исследуемых изображений. Функция ранговой оценки (англ. – Rank) [4] подобна функции SAD, однако вместо сравнения значений цветовой интенсивности производится сравнение порядковых номеров интенсивности пикселей.

Был проведен анализ возможностей и областей применения различных функций, реализующих корреляционную обработку цифровых оптических изображений для решения задач диагностических исследований в случае, если одно из исследуемых изображений подвергается влиянию искажений, шумов или монотонному амплитудному сдвигу. Получено, что наилучшими параметрами для использования в системах диагностики при применении корреляционного анализа цифровых изображений обладают функции NCC и NSSD, которые наиболее устойчивы к воздействию шумов и искажений, при этом предпочтительной является функция NCC, время измерений которой при размере окна сканирования 15x15 пикселей сравнимо с временем анализа функций SSD и SAD, не использующих нормализацию.

Для реализации системы корреляционной обработки изображений было разработано программное приложение на языке программирования java, интерфейс которого представлен на рисунке 1. Интерфейс функции имеет два синхронизированных рабочих окна. Левое окно предназначено для ввода изображения-образца, а правое – для ввода исследуемого изображения, т.е. изображения, методы посредством параметров которого происходит установление степени совпадения (различия).



## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

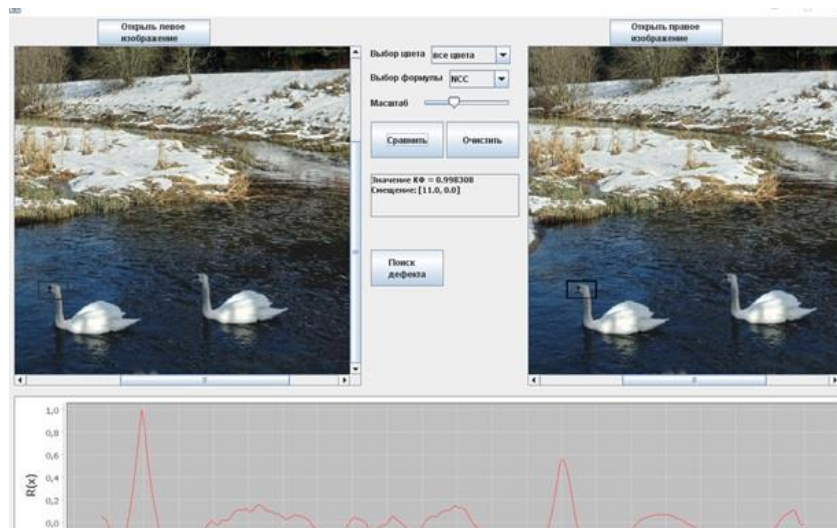


Рисунок 1 – Интерфейс программного приложения для корреляционной обработки изображений. Пример работы программы для анализа подлинности и выявления фальсификации изображений.

Также программное приложение обеспечивает возможность построения трехмерного графика корреляционной функции для всех точек изображения. Интерфейс приложения обеспечивает выполнение следующих пользовательских функции: изменение размера изображений с помощью слайдера и колесика мыши, выбор вида корреляционной функции (КФ); определение спектрального диапазона анализа. Выбор цветового канала позволяет получать точное значение КФ отдельно в красном, зеленом, синем участках спектра, а также в их суммарном диапазоне. График зависимости значения КФ от координат между рабочими окнами в пикселях представлен в нижнем окне графика. Для удобства на графике представлены нормированные от 0 до 1 значения КФ.

Карта корреляции – это трёхмерный график, который показывает разницу (значение корреляционной функции) между двумя изображениями объектов в зависимости от координат. С помощью построения карты корреляции двух изображений можно идентифицировать или классифицировать объекты, определять дефекты, т.е. производить диагностику объектов исследований. Таким образом, построение карт корреляции является актуальной на сегодняшний день задачей, которая послужит хорошим инструментом во многих научных, технологических и диагностических исследованиях.

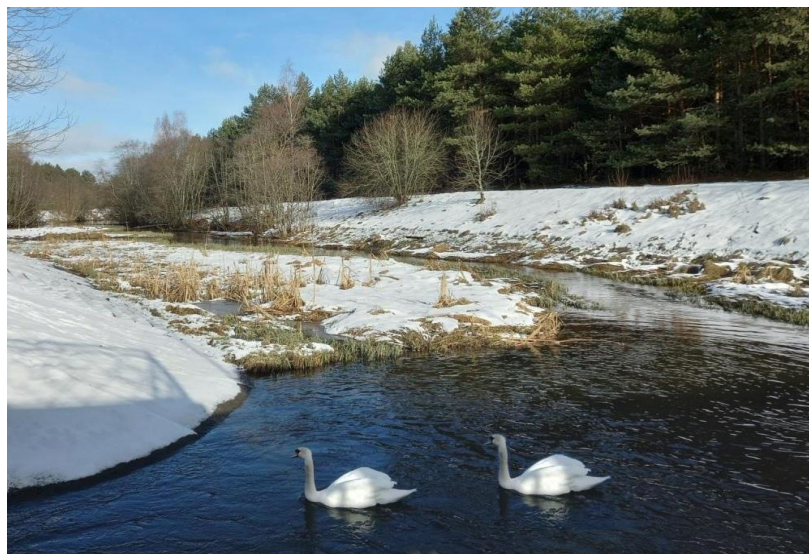


Рисунок 2 – Пример изображения, на котором один из лебедей является подлинным, а второй фальсифицирован, т.е. наклеен с помощью одного из редакторов изображений

Проведены экспериментальные исследования разработанной системы корреляционной обработки для решения такой задачи криминалистики, как анализ подлинности и выявления фальсификации изображений. На рисунке 2 представлено изображение, на котором один из лебедей является подлинным, а второй фальсифицирован, т.е. наклеен с помощью одного из редакторов изображений. Вывод о подлинности или фальсификации объекта делается на основании построения трехмерной карты корреляции (рисунок 3) либо для всего изображения, либо для любого выделенного фрагмента, при этом анализируется значение корреляционной функции выделенной области изображения.

Данное программное приложение обеспечивает возможность построения трехмерной карты корреляции (рисунок 3) для любого выделенного фрагмента, что позволяет обнаруживать незаметные глазу различия исследуемых объектов. В данном случае исследуемыми областями являются изображения левого и правого лебедей. На рисунке 3а приведен трехмерный график корреляционной изображений функции, на котором имеются два максимума (обнаруженные изображения лебедей), первый со значением  $KФ=0,997$  (левый лебедь), а второй – со значением  $KФ=0,83$  (правый лебедь). Это является первым свидетельством того, что изображение правого лебеда фальсифицировано.

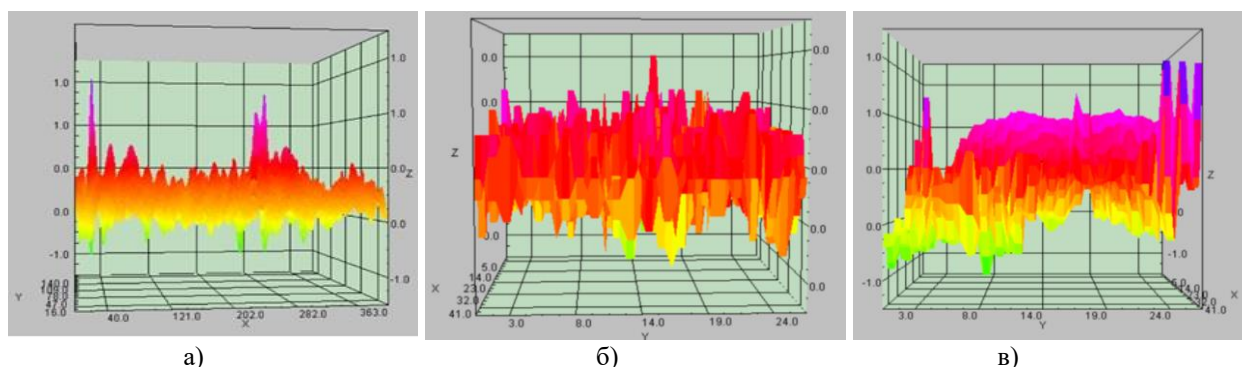


Рисунок 3 – Пример построения трехмерного графика корреляционной изображений функции (а) и карты корреляции для выбранной области левого (б) и правого (в) лебедей.

Затем осуществляется построение карты корреляции для выбранной области левого (б) и правого (в) лебедей (рисунок 3 б,в). Разброс значений карты корреляции для изображения левого лебеда (б) составляет 0,02 – 0,03. Значения карты корреляции для правого лебеда (в) составляют 0,6 – 0,7, причем максимальное значение достигается на границах выделенной области. Это является вторым свидетельством того, что изображение правого лебеда фальсифицировано т.е. наклеено с помощью одного из редакторов изображений.

Таким образом вывод о наличии фальсифиции изображения делается по минимальному значению корреляционной функции выделенной области изображения и по максимальному разбросу значений карты корреляции выбранной области

#### Список литературы

1. Ручкин, В. Н. Современные компьютерные технологии и криминалистика: учебное пособие / В. Н. Ручкин, В. В. Фомин. - Рязань : Академия ФСИН России, 2019. – 101 с. – ISBN 978-5-7743-0920-7.
2. Hartley, R. Multiple view geometry in computer vision. / R. Hartley, A. Zisserman. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 672 p.
3. Brown, M.Z. Advances in computational stereo / M.Z. Brown // IEEE transactions on PAMI. – 2003. – Vol. 25, № 8 – P. 993–1008.
- 4 Чумаченко, А.В. Оптимизация вычисления SAD для задачи восстановления рельефа по изображениям стереопар в высокопроизводительных системах стереозрения / А.В. Чумаченко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – Т. 140, № 3. – С. 89–96.
5. Zabih, R. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence / R. Zabih, J. Woodfill // Computer Vision - ECCV '94: Proc of Third European Conference on Computer Vision, Stockholm, 2-6 May 1994. – Springer, 1994. – P. 150–158.

УДК 004.65:004.4:004.5;543.51

Коваленко А. Н.<sup>1</sup>, Махнач Н. В.<sup>2</sup>, Коваленко Е. И.<sup>2</sup>, Сытова С. Н.<sup>1</sup>, Черепица С. В.<sup>1</sup>

## **ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЕЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПОИСКА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ DICOM ФОРМАТА В LIMS ELAB**

<sup>1</sup> Институт ядерных проблем Белгосуниверситета, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Доклад посвящен демонстрации возможностей системы по интеграции различных видов данных и их представлений в рамках единого окружения, построенного на ядре информационной системы eLab. Для каждой из заявленных предметных областей (масс-спектрометрический поиск и визуализация изображений DICOM) решена проблема обеспечения представления в виде набора данных системы eLab.

Лабораторные информационные системы (ЛИС, LIMS) – важная составляющая для обеспечения хранения и обработки данных современных лабораторий. Обработка экспериментальных данных в масс-спектрометрии представляет собой сложную задачу, для решения которой требуются обширные знания многих пакетов программ, имеющих различные алгоритмы, требования к формату данных и пользовательские интерфейсы. Сбор, хранение и анализ данных медицинской визуализации – изображений компьютерной томографии (КТ), магнитной резонансной томографии (МРТ), ультразвуковых исследований (УЗИ) и т. д. – также требует применения специализированного программного обеспечения и работы с большими массивами данных. Реализация ЛИС в виде веб-приложения в настоящее время считается стандартным вариантом для лабораторий малого и среднего масштаба. Общей целью работы лаборатории аналитических исследований НИИ ЯП БГУ по разработке собственной ЛИС на базе ядра информационной системы eLab (Electronic Laboratory) [1] является разработка модулей ЛИС для хранения результатов масс-спектрометрии и идентификации неизвестных веществ с использованием масс-спектрометрических библиотек, а также медицинских изображений в виде баз данных SQL-сервера. Формат данных mzXML является общим форматом файлов на основе XML (eXtensible Markup Language – расширяемый язык разметки) для масс-спектрометрических данных протеомики, других биологических и химических направлений. Исходные проприетарные форматы файлов большинства производителей масс-спектрометрического оборудования могут быть преобразованы в открытый формат mzXML. Формат mzXML является международно-принятой спецификацией, что позволяет передавать данные, извлечённые из ЛИС, в другие системы и прикладные программы (например, ProteoWizard и др.). Отметим также индустриальный стандарт для систем формирования медицинских изображений (КТ, МРТ, УЗИ) – это протокол и формат DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

Целью работы было: продемонстрировать возможности системы по интеграции различных видов данных и их представлений в рамках единого окружения, построенного на ядре системы eLab, а также обеспечить для масс-спектрометрического поиска и визуализации изображений DICOM представление в виде набора данных (dataset) системы eLab.

Система управления лабораторной информацией разработана таким образом, что различные предметные области (рабочие места) могут быть изолированы в виде отдельных мини-приложений (модулей), которые при этом отображаются в едином пользовательском интерфейсе, формируются из элементов стандартной библиотеки ядра системы, пользуются общими службами системы, не влияют друг на друга, так как пользуются различными базами данных, которые могут находиться на физически разных серверах. Также особенностью интерфейса системы является то, что объектом манипуляций пользователя является один набор данных (dataset), который представляет собой таблицу с типизованными колонками. Над таким набором данных пользователь может производить следующие действия:

- навигация (выбор страницы, диапазона записей);
- выбор колонок (только необходимая информация);

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

- применение фильтров (указание какой текст должны содержать какие колонки);
- создать отчёт по результирующему набору данных (сформировать документ офисного пакета – электронную таблицу или текст).

Масс-спектрометрическая база данных (Модуль MS-поиска) включает в себя следующие компоненты: Таблицы Пиков, Спектров, Компонентов, Синонимов. Используемая схема БД описана в [2]. Результирующий набор данных – это список спектров, потому что поиск осуществляется по спектру и результатом является фильтрованный именно по этому критерию набор данных (рисунок 1).

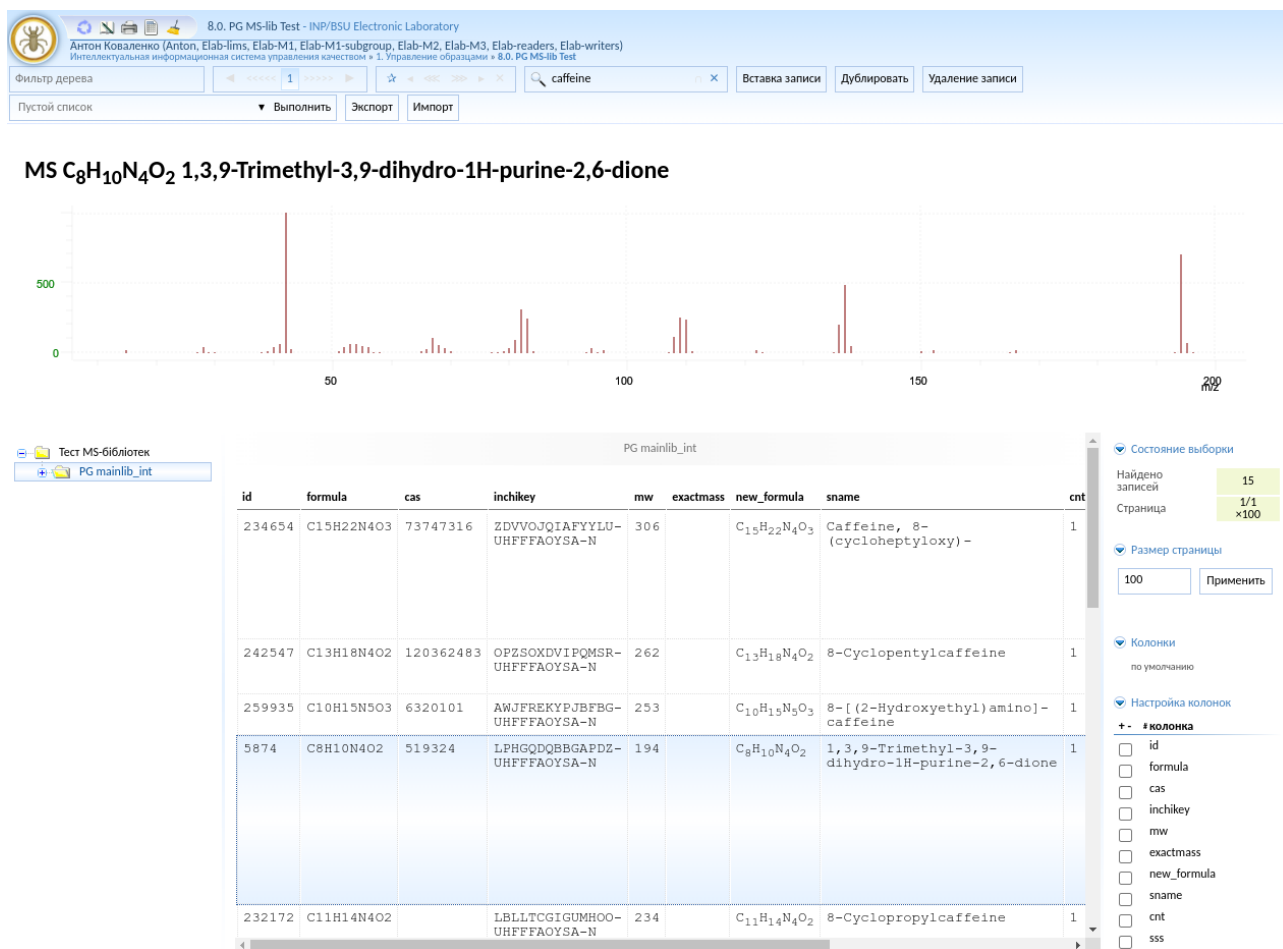


Рисунок 1 – Модуль масс-спектрометрического поиска системы eLab

Нами разработан конвертер файлов mzXML, предназначенный для формирования внутреннего представления масс-спектра (стандартная абстракция). С использованием данного конвертера поиск любого масс-спектра осуществляется по следующему алгоритму.

1. Получить файл «сырых» экспериментальных данных в любом поддерживаемом формате через пользовательский интерфейс (кнопка Загрузить) или через вызов системного API (<http://server.elab/modules/mslib/?method=upload>).
2. Выполнить преобразование данных закрытого формата в открытый mzXML (который выбран нами в качестве внутреннего представления) с помощью вызова файлового конвертера `/opt/unichrom/ucc input_file.raw output_file.mzxml`.
3. Выполнить XML-разбор файла `output_file.mzxml`.
4. Извлечь нужный скан (масс-спектр).
5. Передать спектр в текстовом виде (mz,int;...mz,int) во временную таблицу на SQL-сервере (SPECTRA\_TMP).
6. Вызвать на SQL-сервере хранимую процедуру MSSEARCH(max\_hit\_cout).
7. Получить из хранимой процедуры список ID кандидатов спектров, сортированный по

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

максимальному подобию.

8. Применить фильтр из полученных ID к списку масс-спектров и отобразить результаты поиска.

Задачи по реализации модуля DICOM поиска были следующие:

- обеспечить предварительную визуализацию данных МРТ, КТ исследований, хранящихся на свободно-распространяемом цифровом архиве медицинских изображений (picture archiving and communication systems – PACS) Orthanc;
- организовать просмотр и поиск с минимальной модификацией конфигурации хранилища данных.

Стандартная установка PACS Orthanc имеет собственный Web-интерфейс, который в ряде случаев не удовлетворяет требованиями клиник, но весьма удобен для администраторов систем. В связи с тем, что хранилище данных Orthanc (PostgreSQL) представляет собой денормализованную реляционную базу данных, имеется возможность подключиться к базам данных напрямую и обеспечить собственное представление данных. Схема базы данных опубликована и её анализ не представляет никаких проблем.

Результат работы реализованного алгоритма представлен на рисунке 2.

The screenshot shows the Orthanc web interface. On the left is a tree view of the DICOM server structure, including folders for patients and organizations. The main area displays a table of search results with columns: internalid, resourcetype, publicid, parentid, and img. Three rows of results are visible, each with a corresponding axial MRI brain scan image. On the right, there are controls for search results, including 'Состояние выборки' (3 found records), 'Размер страницы' (100), 'Настройка колонок' (columns: internalid, resourcetype, publicid, parentid, img), and 'Сортировка' (sorting).

internalid	resourcetype	publicid	parentid	img
14	3	18534e3f-be89e32b-83dfb41b-c5569b33-a4d6e1e3	13	
15	3	59fccd7c-b192ef57-84b494b6-dc18d845-845f34ea	13	
16	3	9acba157-6d88298f-6f8f1c00-8b82a16f-470487b1	13	

Рисунок 2 – Модуль просмотра архива сервера PASC Orthanc

Таким образом, в работе выполнена интеграция различных видов данных и их представлений в единое окружение на базе ядра системы eLab.

### Список литературы

1. Сытова С.Н., Дунец А.П., Коваленко А.Н. и др. Информационная система eLab для аккредитованных испытательных лабораторий на основе свободного программного обеспечения // Информатика. – 2017, № 3. – С.49–61.
2. Махнач Н.В., Трофименков И.В. Разработка универсального программного интерфейса для анализа масс-спектрометрической информации // 78-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета : материалы конф. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 10–21 мая 2021 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Г. Сафонов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021. – С. 136-139.

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА МЕЖДУ ОДНОРОДНЫМИ ОБЛАСТЯМИ НА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Предложена и разработана модификация алгоритма оконного сопоставления стереоизображений SAD с использованием механизмов адаптации и локализации. Данная модификация решает одну из главных проблем стереозрения – нахождение соответствия областям высокой степени однородности. Ее работоспособность подтверждается примерами обработки наборов стереоизображений.

**Введение.** С каждым годом увеличивается интерес к робототехнике, появляются новые технологии, позволяющие создавать сложных и мультифункциональных роботов. Одним из простейших способов практической реализации зрения роботов является использование цифровых камер. Однако стандартные цифровые камеры производят двумерные изображения, не позволяющие определить расстояние от точки съёмки до объектов на изображении. Для определения расстояний используются методы кибернетики, а именно – стереозрения. В общем случае сложно получить точную матрицу расстояний объектов до точки съёмки (часто ее называют картой глубины), что обусловлено наложением объектов и наличием однородных областей.

Для построения карты глубины используются локальные и глобальные методы. Локальные строят карту по частям, глобальные – оптимизируют карту целиком. Достоинствами локальных алгоритмов является скорость, а глобальных – точность. Локальные подразделяются на корреляционные – SAD, SSD, NCC, RT, CT (аббревиатуры указывают метрику сходства областей или преобразование, SAD – сумма абсолютных отклонений, SSD – сумма квадратов отклонений, NCC – нормализованная кросс-корреляция, RT – ранговое преобразование, CT – преобразование переписи) и на методы, учитывающие особенности изображений, среди них – HCD (алгоритм детекции углов Харриса), SIFT (масштабно-инвариантное преобразование особенностей), SURF (ускоренный алгоритм надежного нахождения особенностей). В классических локальных методах (SAD, SSD, NCC) не предусмотрен механизм работы с областями высокой однородности [1].

Из вышеперечисленных методов самым простым в программной реализации, надежным и вычислительно эффективным является метод SAD [2]. Наиболее точным, но также и высоко затратным в настоящее время считается метод на основе нейронных сетей (к примеру, ModuleNet). [3]

В работе предложена модификация метода SAD, основанная на использовании механизмов адаптации и локализации, позволяющая повысить точность сопоставления однородных областей.

**Методология.** Идея разработанного алгоритма состоит в адаптивном растяжении областей, для которых ищется соответствие, при их невысокой контрастности. Для оценки порога сохранения информативности в процедуре растяжения применен механизм локализации. В качестве меры контрастности (равномерности) области и значения порога используется средне-квадратичное отклонение (СКО) распределения яркости пикселей на изображении. Для повышения точности и увеличения быстродействия предполагается, что стереопара (далее рассматривается как изображение слева и справа) горизонтально ректифицирована – это позволяет ограничить область поиска соответствий до половины ширины изображения. Для дальнейшей локализации области поиска алгоритм определяется аргумент максимума корреляционной функции стереопары, с некоторым весовым коэффициентом он принимается за максимальное отклонение объектов на первом изображении от их аналогов на втором.

Алгоритм:

1) Вычислить корреляционную функцию изображений стереопары

$$R(\tau) = \frac{\sum_{x,y \in I} (I_1(x,y) - \bar{I}_1)(I_2(x-\tau,y) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{x,y \in I} (I_1(x,y) - \bar{I}_1)^2 \sum_{x,y \in I} (I_2(x-\tau,y) - \bar{I}_2)^2}}, \quad (1)$$

где  $I_1, I_2$  – первое и второе изображение стереопары,  $\tau \in [-N/2; N/2]$  – компенсация сдвига камеры,  $\bar{I}_1$  и  $\bar{I}_2$  – средние значения яркости пикселей на изображениях.

2) Определить максимум  $\max(R(\tau))$  и аргумент  $\operatorname{argmax}(R(\tau))$ . Максимальное отклонение принимается равным:

$$MD = \frac{LC}{\max(R(\tau))} \cdot \operatorname{argmax}(R(\tau)), \quad (2)$$

где  $LC$  – некоторый весовой коэффициент.

Формула (2) подобрана экспериментально,  $\operatorname{argmax}(R(\tau))$  является оценкой среднего отклонения объектов на стереопаре,  $\max(R(\tau))$  характеризует разброс отклонений. Весовой коэффициент экспериментально подобран равным  $LC = 2.2$ .

3) Локализовать пороги по СКО. Для этого левое изображение делится на прямоугольные сегменты. Для каждого сегмента вычисляется его СКО, порог же определяется по следующей формуле:

$$AT_{i,j} = AC \cdot \sqrt{\text{СКО}_{i,j}}, \quad (3)$$

где  $AC$  – весовой коэффициент,  $\text{СКО}_{i,j}$  – значение СКО сегмента  $S_{i,j}$ .

Формула (3) также была получена экспериментально – квадратный корень необходим для усиления ограничения растяжения областей в сегментах достаточного контраста. Весовой коэффициент экспериментально подобран равным  $AC = 2.1$ .

4) Найти соответствия для областей изображения слева на правом: для каждой области первого изображения вдоль эпполярной линии (по горизонтали) определить совпадения во втором, ограничивая область поиска рассчитанным максимальным отклонением  $MD$ . Модификация корректирует области, которым нужно найти соответствия. После получения базовой области определяется, какому сегменту  $S_{i,j}$  она принадлежит, запоминается порог  $AT_{i,j}$ . Далее область увеличивается влево, пока ее контраст не превысит порог или не произойдет выход за пределы изображения. Превышение порога с высокой вероятностью означает, что область распространена на объект, которому она не принадлежит, для устранения чего область уменьшается до своей величины на предыдущей итерации.

5) Вычислить карту глубины. Рассчитать по парам соответствующих областей относительные расстояния, заполнить карту глубины.

**Вычислительная сложность.** Пусть изображение стереопары имеет стороны длины  $N$  пикселей. Классический метод SAD имеет асимптотическую сложность  $O(N^3)$ . Сложность разработанного алгоритма не превышает  $O(N^4)$ , так как увеличенные области максимум могут быть сравнимы по ширине с шириной изображения. Однако на практике, для изображений  $400 \times 500$  время вычисления модифицированным методом в среднем всего в 3 раза дольше классического алгоритма.

**Результаты.** В работе рассмотрены две стереопары с наличием однородных областей. Метод был применен со следующими параметрами: количество сегментов – 25, размер окна сканирования – 7. Для оценки эффективности работы классического SAD и разработанной модификации метода SAD рассмотрены критерии: визуальный анализ, время вычислений и оценка качества карты. Оценка качества карты – максимум ее корреляционной функции  $R_m$ , на основе корреляции Спирмена с истинной картой. Такая мера наименее чувствительна к

различиям в шкалировании значений карты. Карта тем точнее, чем ближе мера качества к единице.



Рисунок 1 – Пример стереопары (левое и правое изображения)

Результаты анализа стереоизображений двумя методами представлены на рисунке 2 и в таблице 1. Модифицированный SAD имеет ряд преимуществ: выше детализация, меньший уровень шума, аккуратная обработка однородных областей (пример – правый верхний угол), в среднем точность увеличивается более, чем на 20%. К недостаткам следует отнести возможные дополнительные искажения (в примере внеслись в виде принятия части стола за часть статуэтки), а также более высокую вычислительную сложность.



Рисунок 2 – а) Визуализация порогов по сегментам (чем выше порог, тем ярче цвет прямоугольника), б) карта глубины полученная классическим SAD, в) полученная модифицированным методом SAD.

Таблица 1

Сравнительная характеристика результатов работы методов на двух примерах

Метод	Пример 1		Пример 2	
	Время, с	$R_m$	Время, с	$R_m$
Классический метод SAD	3.5	0.42	4.8	0.47
Модификация	5.7	0.51	18.3	0.55

**Заключение.** В работе предложена модификация метода SAD, основанная на использовании механизмов адаптации и локализации. Разработанная модификация имеет следующие преимущества в сравнении с классическим SAD: позволяет анализировать части изображений низкого контраста, увеличивает качество карты (в среднем более, чем на 20%) и ее детализацию.

#### Список литературы

1. Multi-object detection and tracking by stereo vision. Pattern Recognition / L. Cai [et al], Vol. 43, Issue 12, 2010, 4028-4041 p.
2. Y. Liu, Local and Global Stereo Methods / Y. Liu and J. Aggarwal // Elsevier eBooks, 2005, 297–308 p.
3. ModuleNet: A Convolutional Neural Network for Stereo Vision. Pattern Recognition / O. Renteria [et al], 2020, 219-228 p.



## ПОТОКОВАЯ ПЕРЕДАЧА МЕДИАКОНТЕНТА ДЛЯ УДАЛЕННЫХ УСТРОЙСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе представлено приложение для системы потоковой передачи медиаконтента для удаленных устройств отображения информации. При проектировании приложения выбран язык программирования Java, а также фреймворки построения Web-приложений Spring Web и Spring Data для работы с базами данных.

В настоящее время существует большое количество устройств для отображения информации. Для упрощения работы со всеми устройствами создаются различные системы управления, совершенствуются системы контроля. Целью данной работы является создание системы потоковой передачи медиаконтента для удалённых устройств отображения информации. Представлено решение ряда задач для достижения поставленной цели – создать устойчивый канал данных для передачи медиаконтента на устройства отображения информации, разработать систему удалённого управления доступом устройств отображения информации к каналам данных, создать структурированное хранилище данных об устройствах отображения информации.

В качестве системы потоковой передачи медиаконтента используется сервер и устройства отображения информации. Центром системы является сервер, на котором присутствует приложение, управляющее ею, написанное на языке программирования Java. Для правильной организации системы необходимо выбрать устройства вывода, которые способны принимать запросы от приложения на сервере. Самым распространенным способом взаимодействия и передачи данных в сети Интернет является REST API, который позволяет использовать протокол HTTP. Протокол HTTP поддерживается любым браузером, то есть подойдет любое устройство, которые может запускать его. В качестве такого устройства, выбран телевизор со встроенной операционной системой Android, которая поддерживает работу браузера.

Реализовать подобную систему решено на языке объектно-ориентированного программирования Java, который имеет встроенный функционал для потоковой передачи информации любого типа в виде потока байт (рисунок 1).

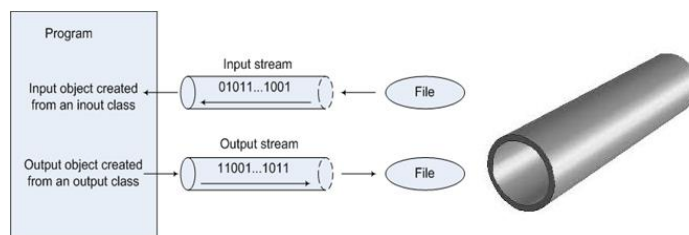


Рисунок 1 – Чтение и запись информации из файла с помощью потоковой передачи данных

Для того чтобы информация об устройствах и медиаконтенте сохранялась, создается хранилище данных, в котором будет храниться вся необходимая информация для корректной работы системы, а именно об устройствах, который включены в эту систему, данные о медиаконтенте и на какое устройство оно должно транслироваться. Стоит отметить, что реляционные базы данных удобны для работы с текстовой информацией, но хранить медиаконтент будет FTP-сервер, ссылка на расположение медиаконтента в нем будет храниться в базе данных.

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

Для удобства взаимодействия базы данных и приложения на Java существует технология ORM, которая позволяет строить интерпретации таблиц в базе данных с классами сущностей, написанных на Java. Самой удобной архитектурой такой приложения является MVC, схема которой приведена на рисунке 2.

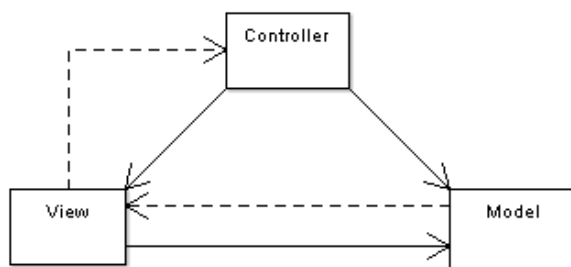


Рисунок 2 – Схема MVC архитектуры

Опишем каждую компоненту данной архитектуры в соответствии с задачами данной работы. Компонент «Модель» соответствует всей логике, связанной с данными, с которой работает пользователь. Это могут быть либо данные, которые передаются между компонентами View и Controller, либо любые другие данные, связанные с бизнес-логикой. Компонент View используется для всей логики пользовательского интерфейса приложения. В данном случае, пользовательский интерфейс – это медиаконтент, переданный на браузер устройства отображения информации. Контроллеры действуют как интерфейс между компонентами модели и представления для обработки всей бизнес-логики и входящих запросов, манипулирования данными с использованием компонента модели и взаимодействия с представлениями для вывода окончательного результата.

Данную модель архитектуры на языке программирования Java помогает создать фреймворк Spring Web. В качестве реализации ORM технологии удобен фреймворк Spring Data, который будет настраивать взаимодействие между сущностями, написанными на Java и таблицами в базе данных PostgreSQL. Для простой настройки работы приложения на сервере будет использоваться фреймворк Spring Boot, который автоматизирует запуск приложения на сервере.

Описание структуры базы данных, которая будет храниться в себе все вышеперечисленное, представлено на рисунке 3.

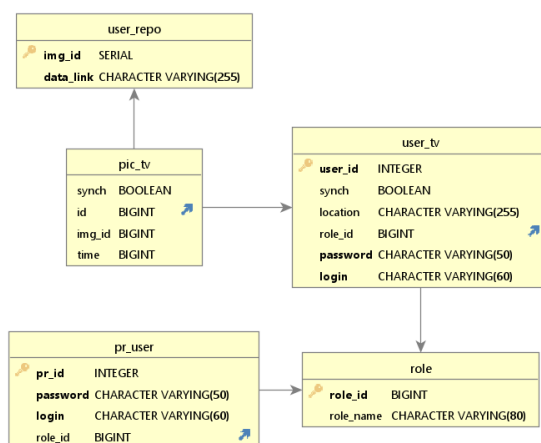


Рисунок 3 – Архитектура базы данных приложения

Краткое опишем содержимое каждой таблицы. Таблица role хранит в себе все возможные роли пользователя или устройства в системе. Таблица pr\_user хранит в себе информацию о привилегированных пользователях с различным уровнем доступа, которые могут ка-

ким-либо образом влиять на работу устройства или информацию с помощью системы. Таблица `user_tv` хранит в себе информацию о пользователях (устройствах), которые отображают информацию. Таблица `user_геро` хранит в себе информацию о медиаконтенте (изображениях), который может отображаться на устройствах. Таблица `pic_tv` хранит в себе расписание отображения конкретного медиаконтента на конкретном устройстве. Также эта таблица обеспечивает связь типа «многие ко многим» между таблицей `user` и `user_геро`.

Создав базу данных устройств, необходимо реализовать контроллеры в коде программы, которые будут проводить все необходимые манипуляции над устройствами, а также данными, которые на них будут отправляться. Для удобства написания кода программы, а также для соблюдения бизнес-логики написания кода была разработана модель взаимодействия, представленная на рисунке 4.

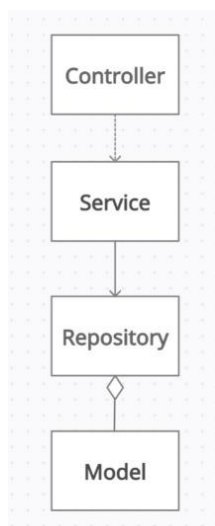


Рисунок 4 – Архитектура взаимодействия компонентов контроллер-модель

В состав модели входят Контроллер – обработчик запросов, модель – представление данных, их функции описаны выше, Репозиторий – хранилище однотипных сущностей (моделей), которые используются для удобного доступа к данным и их обработки. Сервис – инструмент для работы над репозиторием и данными в нем, его включение в модель необходимо, так как репозиторий с точки зрения бизнес-логики не может производить действия над самим собой.

Предложенная система управления потоковой передачи данных на устройства вывода информации может быть интегрирована исходя из поставленных для этой системы задач в проект "Цифровой факультет" факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ [4].

#### Список литературы

1. Блинов, И. Н., Романчик, В. С. Java from EPAM : учеб.-метод. пособие / И. Н. Блинов, В. С. Романчик. — Минск: Четыре четверти, 2020. — 560 с.
2. Paraschiv, E. Build your API with Spring / E. Paraschiv [Electronic resource]. – 2020. - Mode of access: <https://www.baeldung.com/rest-api-spring-guide>. - Date of access: 8.04.2023.
3. Рогов, Е. PostgreSQL изнутри / Е. Рогов. – 3-е изд. – Москва : ДМК Пресс, 2022. – 660с.
4. Ю. И. Воротницкий и др. Цифровая интеллектуальная среда факультета / Ю. И. Воротницкий, К. В. Козадаев, Е. И. Козлова, И. А. Шалатонин, Е. А. Головатая, А. М. Соболев // материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апреля 2020 г. / редкол.: В. В. Скаун (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2020. – С.19 – 22.

## СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЕ СКРЫТИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ КОММУНИКАЦИЙ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В статье рассмотрены подходы к скрытию секретных данных о коммуникациях в картографических изображениях. Сформулированы требования к структуре скрываемых данных.

В настоящее время цифровые спутниковые снимки широко используются в различных целях:

- ориентация на местности,
- анализ метеорологических и гидрометеорологических данных,
- и многое другое.

Однако, не все объекты, на спутниковых снимках, могут находиться в открытом доступе. Согласно законодательству Республики Беларусь, в открытом доступе запрещено размещать характеристики и расположение на местности объектов протяженного характера, таких как [1]:

- инфраструктура органов пограничной службы,
- привязка на генеральном плане местности схем отводов нефтепроводов и газопроводов, питающих электростанции,
- схемы энергетики регионов и объединенных энергосистем и их развития,
- схемы внешнего электроснабжения электрифицируемой железной дороги (существующие, проектируемые и планируемые на перспективу),
- плановые координаты геодезических пунктов, определенные с точностью 50 метров и точнее.

Таким образом, такая информация нуждается в строгом режиме хранения и, в тоже время, должна быть предусмотрена возможность ее использования в практической деятельности, как в стационарных, так и мобильных условиях.

Оптимальным вариантом обеспечения требуемого режима обращения с подобной информацией является компьютерная стеганография. Использование стеганографии позволяет обеспечить не только требуемую степень защиты информации, но и ее защиту от несанкционированных пользователей при передаче даже по открытым каналам связи.

**Спутниковые данные**, приходящие на аппаратуру приема не имеют какого-то формата представления, и перед использованием их необходимо привести к одному из существующих. Исходя из международной классификации можно выделить следующие форматы представления спутниковых данных:

-RAW, TIFF – включает радиометрическую коррекцию искажений. Может включать геометрическую коррекцию систематических ошибок датчиков сканирующей системы.

-GeoTIFF – включает в себя преобразования предыдущих форматов, а также приведение изображений к стандартной картографической проекции [2].

В зависимости от аппаратуры съемки на спутнике и методов обработки спутниковых данных спутниковые снимки могут иметь различное пространственное разрешение [3]. На данный момент не существует унифицированной классификации типов спутниковых снимков по их пространственным разрешениям, поэтому их можно условно разделить на 3 группы: с низким, средним и высоким пространственными разрешениями (рисунок 1).

В данной работе используются спутниковые снимки с высоким пространственным разрешением (свыше 1 м), предназначенные для создания и обновления топографических и специальных карт, создания цифровых моделей рельефа и др. (рисунок 1.в) [4].

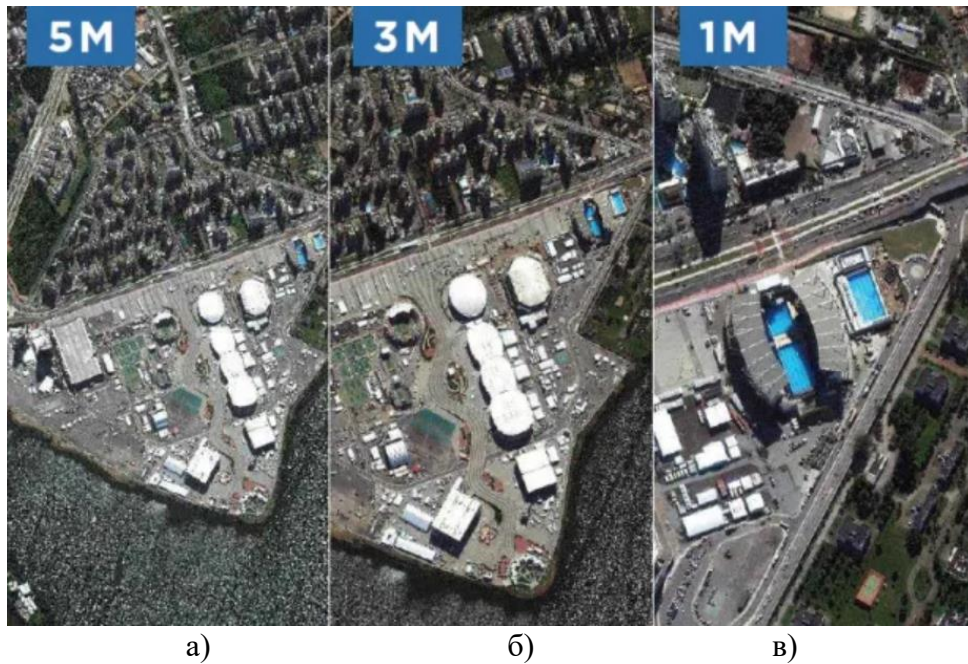


Рисунок 1 – Спутниковые снимки с низким (а), средним (б) и высоким (в) пространственными разрешениями

**Алгоритм встраивания файла с координатами узлов коммуникаций в спутниковый снимок.** Первоначально необходимо для каждой отдельной группы линий коммуникации определить основные виды узлов, использующихся на данном участке (рисунок 2 а,б).

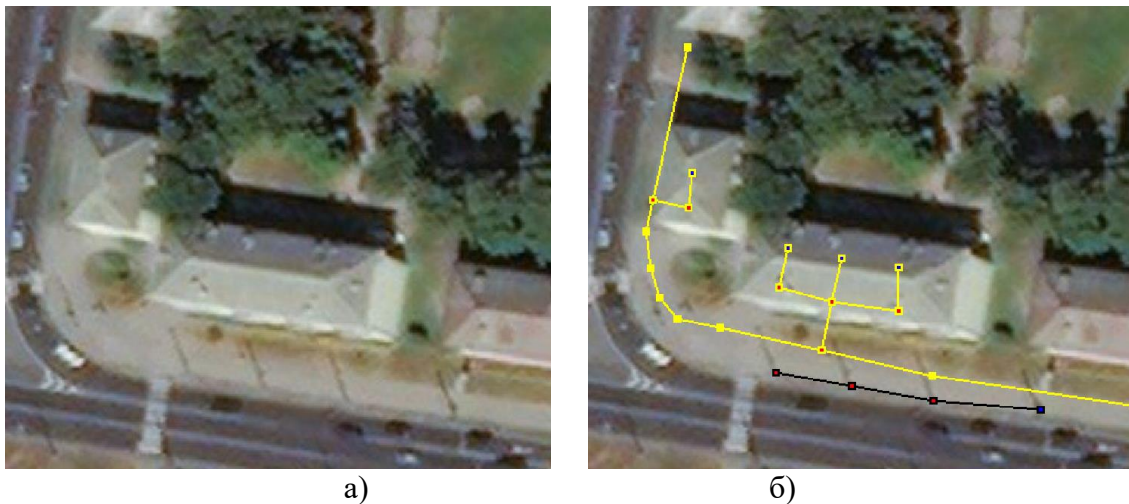


Рисунок 2 – Исходный спутниковый снимок (а) и с нанесенными линиями коммуникации (б)

Затем формируется файл с координатами узлов коммуникаций, которые разделяются на группы по типу коммуникации и каждому узлу присваивается номер, соответствующий виду этого узла. Также, для работы непосредственно с узлами и линиями коммуникаций необходимо к встраиваемым данным добавить:

- изображения узлов коммуникаций и их схемы,
- текстовые данные с инструкциями по ремонту и эксплуатации, пояснениями относительно отображенных на снимке объектов.

Занимаемый объем встраиваемых данных можно рассчитать, как сумму всех входящих в него файлов. В сумме, данные, встраиваемые в спутниковый снимок размером 1000\*1000 пикселей и объемом примерно 3.5 мб, составят около 0.25 мб.

Например, информация, характеризующая скрываемый протяженный объект, может быть представлена следующим образом (рисунок 3).

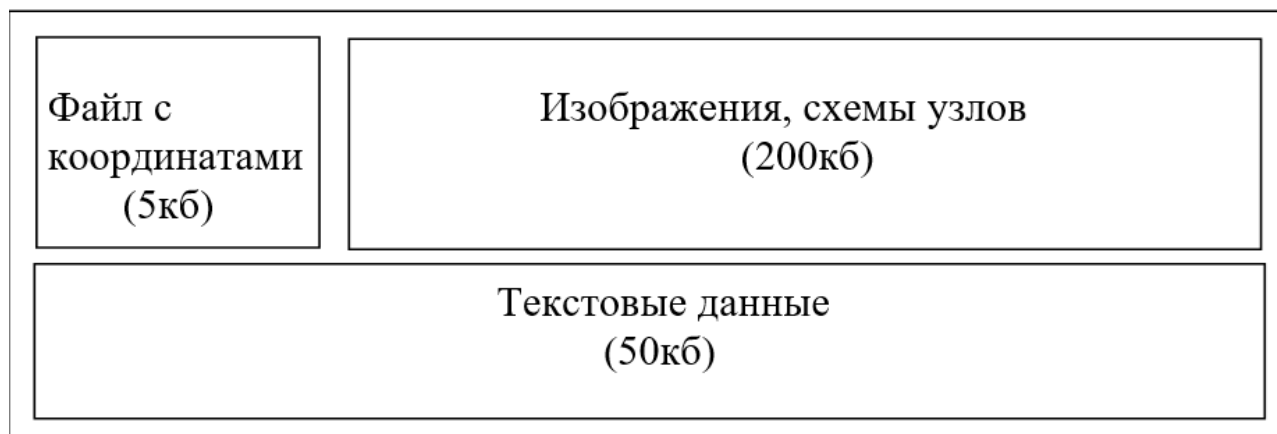


Рисунок 3 – Схематичное изображение данных, встраиваемых в спутниковый снимок.

После того, как сформирован файл с информацией об объекте его скрытно встраивают в само изображение. Исходя из размеров получившегося файла координат, оптимальным методом встраивания является стеганографический метод Жао – Коха, потому что он имеет ряд преимуществ по сравнению с другими алгоритмами, в первую очередь, высокую стеганостойкость к атакам на сжатие и обнаружение и приемлемую пропускную способность [5].

В результате встраивания информации исходное картографическое изображение искажается за счет внесения изменения в коэффициенты ДКП.

Исходя из соображений безопасности, при встраивании информации в изображение можно использовать генераторы псевдослучайных чисел.

Для меньшей заметности искажений данные целесообразно встраивать в менее монотонные участки изображения.

После стеганографических модификаций спутниковый снимок не приобретает визуальных изменений, по сравнению с оригиналом и его можно использовать даже в открытом санкционированом доступе.

#### Список литературы

1. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21400783&p1=1>. (дата обращения 2023-02-16).
2. Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ из космоса. Мировой опыт / А. В. Беленов // Геоматика.- №4. 2009.
3. Wikipedia. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Разрешение\\_\(компьютерная\\_графика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Разрешение_(компьютерная_графика)) (дата обращения 2023-02-20).
4. Виды космической съемки – URL: <https://innoter.com/articles/vidy-kosmicheskoy-semki/> (дата обращения 2023-02-20).
5. Компьютерная стеганография / В.С. Садов. – М: РИВШ, 2014. – 172 с.

## ЗАЩИТА ПОЛИГРАФИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе рассматриваются технологии формирования и нанесения цифровых водяных знаков с цифровых носителей на полиграфическую продукцию с целью защиты авторских прав на нее.

Одним из важнейших направлений применения цифровой стеганографии является встраивание цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в изображения для защиты авторских прав [1].

ЦВЗ представляют собой специализированную метку, встраиваемую в цифровой сигнал и содержащую информацию о авторе, которая не видна для человеческого глаза.

ЦВЗ также могут использоваться и для защиты авторских прав на полиграфическую продукцию. В этом случае метка встраивается в цифровую копию изображения, которое в дальнейшем используется для произведения печатных копий оригинала. Для извлечения ЦВЗ распечатанную копию нужно отсканировать и получить цифровую.

Проблемы при таком подходе возникают при извлечении ЦВЗ, так как при печати и сканировании исходного изображения получается его искаженная копия. В данной работе приведен алгоритм, реализующий встраивание и извлечение ЦВЗ стойкий к процессам печати и сканирования изображения.

Возникающие в ходе процесса печати и сканирования искажения можно разделить на два типа: геометрические искажения и искажения значений пикселей.

Геометрические искажения заключаются в несоответствии положения точек исходного изображения и отсканированного, что приводит к невозможности извлечения ЦВЗ. Математически их можно описать совокупностью проективных преобразований точек на плоскости [2]:

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}$  – вектор, описывающий положение исходной точки,  $\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{w} \end{bmatrix}$  – вектор, описывающий новое положение точки,  $t_{ij}$  – коэффициенты матрицы преобразования.

Искажения значений пикселей после прохождения канала печати-сканирования можно описать совокупностью следующих преобразований [3]:

- сглаживание гауссовым фильтром с параметром  $\sigma_s$  :

$$y_\sigma(n_1, n_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_s^2} \sum_{m_1=-3\sigma_s}^{3\sigma_s} \sum_{m_2=-3\sigma_s}^{3\sigma_s} x(n_1 - m_1, n_2 - m_2) \exp\left(-\frac{m_1^2 - m_2^2}{2\sigma_s^2}\right), \quad (2)$$

где  $y_\sigma(n_1, n_2)$  – точка сглаженного изображения,  $x(n_1, n_2)$  – точка изображения до преобразования%;

- наложение белого шума  $\xi(n_1, n_2)$  с мат ожиданием  $M_\xi = 0$  и среднеквадратичным отклонением  $\sigma_\xi$  :

$$y_\xi(n_1, n_2) = y_\sigma(n_1, n_2) + \xi(n_1, n_2), \quad (3)$$

где  $y_\xi(n_1, n_2)$  – точка зашумленного изображения.

Предлагаемый алгоритм встраивания ЦВЗ основан на использовании опорных точек для компенсации геометрических искажений и встраивании ЦВЗ в частотную область дискретного косинусного преобразования (ДКП) с применением метода расширения спектра.

В общем виде алгоритм можно описать в виде последовательности следующих шагов:

- формирование ЦВЗ на основе псевдослучайной последовательности,
- встраивание ЦВЗ в частотную область контейнера,
- компенсация геометрических искажений,
- извлечение ЦВЗ.

Формирование последовательности для встраивания производится методом, основанным на методах расширения спектра, что повышает устойчивость ЦВЗ к помехам. Исходный ЦВЗ представляет собой некоторую последовательность бит  $b$  размера  $k$ . Генерируется  $M$ -последовательность длиной  $n$  с помощью линейного регистра с обратной связью (ЛРСОС) длиной  $d$  бит, определенной отводной последовательностью и начальным заполнением.

На основе полученной псевдослучайной последовательности ПСП длиной  $n$  генерируется новая последовательность  $W$ , где каждые  $n$  чисел, соответствующие одному биту ЦВЗ  $b$ , вычисляются по формуле:

$$W(i) = \alpha(-1)^b M(i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент усиления.

Встраивание осуществляется в среднечастотную область коэффициентов ДКП синего канала изображения-контейнера, так как к искажениям в этом канале менее всего чувствительна зрительная система человека (ЗСЧ). Среднечастотные коэффициенты ДКП выбираются исходя из того, что наибольшим искажениям подвержены высокочастотные коэффициенты, а к искажениям в низкочастотной области больше всего чувствительна ЗСЧ. Процесс встраивания ЦВЗ осуществляется следующим образом:

В исходном изображении  $I$  выделяется синяя составляющая  $I_B$ . Полученная матрица  $I_B$  размером  $N_1 \times N_2$  разбивается на непересекающиеся блоки размера  $n_1 \times n_1$ . Последовательность  $W$  полученная на предыдущем этапе также разбивается на тоже число блоков  $W_m$ .

Для блоков  $I_B$  и  $W_m$  строятся таблицы, в которых первый столбец это номер блока, второй значение среднеквадратического отклонения интенсивностей пикселей (для  $I_B$ ) и суммы модулей значащих элементов (для  $W_m$ ). Таблицы сортируются по убыванию значений второго столбца и далее из вторых столбцов составляется таблица соответствий, которая будет указывать, в какие блоки  $I_B$  встраивать блоки  $W_m$ .

Далее вычисляется ДКП блоков  $I_B$ , в результате чего получаем матрицу  $F$  коэффициентов ДКП. Блоки  $W_m$  аддитивно встраиваются в среднечастотные коэффициенты соответствующих блоков  $F$  в соответствии с таблицей, в результате получается матрица  $F'$ . Далее вычисляется ОДКП блоков матрицы  $F'$  и получается  $I_B'$ . После чего матрица  $I_B'$  совмещается с остальными компонентами  $I_R$  и  $I_G$ , в результате получается заполненный контейнер  $I'$ .

Компенсация геометрических искажений основывается на сопоставлении особых точек оригинального изображения и искаженной копии и нахождении обратного преобразования точек.

Выбор данного подхода обоснован следующими его преимуществами:

- при использовании детекторов особых точек нет необходимости встраивать в изображение-контейнер дополнительную информацию для нахождения обратного преобразования, что повышает пропускную способность алгоритма встраивания/извлечения ЦВЗ.
- обеспечивается стойкость ряда алгоритмов детектирования особых точек при внесении искажений в контейнер.

Сначала на оригинальном и отсканированном изображении с помощью выбранного детектора и дескриптора осуществляется поиск особых точек и их описание.

Следующим шагом является нахождение соответствий между найденными особыми точками оригинального изображения и искаженного. Для каждой особой точки оригинального изображения на отсканированной копии находятся по два наиболее близких соответствия, для чего применяются алгоритмы приближенного поиска  $k$ -ближайших соседей.



Далее отбрасываются плохие соответствия при помощи теста Лоу, который заключается в проверке следующего неравенства:

$$dist(m) < \alpha * dist(n), \quad (5)$$

где  $m$  – ближайшая точка,  $n$  – ближайшая после  $m$ ,  $\alpha$  – некоторая величина от 0 до 1,  $dist$  – рассчитанное расстояние.

Далее происходит непосредственно компенсация геометрических искажений отсканированной копии. Для этого находится преобразование положения точек отсканированного изображения к положению точек оригинала вида (1). Для нахождения матрицы преобразования используется алгоритм RANSAC. В качестве алгоритма детектирования и описания особых точек рекомендуется использовать SIFT.

Извлечение ЦВЗ происходит при наличии исходного изображения, начального заполнения генератора случайных последовательностей и таблицы соответствий, полученной при встраивании. Процесс извлечения происходит следующим образом. В полученном после компенсации геометрических искажений изображении  $I''$  и исходном изображении выделяются синие каналы  $I_B''$  и  $I_B$ , которые также разбиваются на блоки размера  $n_1 \times n_1$ . К блокам  $I_B''$  и  $I_B$  применяется поблочное ДКП и извлекаются коэффициенты, в которые происходило встраивание ЦВЗ. Находится разность строк  $I_W'$  и  $I_w$  в виде  $W_{sort}'$ , которая разбивается на такое же число блоков  $Wm_{sort}'$ , как и  $I_W'$ . Далее с использованием таблицы соответствий, полученной при встраивании, осуществляется перестановка блоков  $Wm_{sort}'$  так, чтобы их положение соответствовало исходному положению блоков в  $Wm$ . Полученные блоки преобразуются в строку бит  $W'$ .

ЛРСОС генерирует ПСП  $M$  с применением ключа, который использовался при встраивании. Для каждого  $n$  бит, которые соответствуют одному биту ЦВЗ, вычисляется величина  $\delta$ :

$$\delta = \sum_{i=1}^n W'(i) M(i), \quad (6)$$

а бит ЦВЗ определяется по формуле:

$$b = \begin{cases} 1, & \delta < 0; \\ 0, & \delta \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

В работе представлен алгоритм встраивания и извлечения ЦВЗ, стойкий к процессам печати и сканирования изображения. Основу алгоритма составляет применение алгоритма детектирования и описания особых точек для компенсации геометрических искажений, а также встраивание в среднечастотные коэффициенты ДКП с применением метода расширения спектра. В качестве ключевой информации используется начальное заполнение ЛРСОС и таблица соответствий. При извлечении необходимо наличие исходного незаполненного контейнера.

#### Список литературы

1. Грибунин, В.Г. Цифровая стеганография: учебное пособие / В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев. – Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 264 с.
2. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ: Учебное пособие.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
3. Н.И. Глумов, В.А. Митекин, А.В. Сергеев, В.А. Федосеев. Алгоритм извлечения скрытой информации из отсканированных полиграфических изделий. Вестник СГАУ, №2 (15), 2008. -С. 22

## AN IMAGE STEGANOGRAPHY ALGORITHM BASED ON CHAOTIC SEQUENCE

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Представлены результаты исследования стеганографического алгоритма на основе хаотической последовательности и матричного кодирования с минимальным изменением стеганографического контейнера.

### 1. Introduction in problem

Information hiding is one of the important means of information security. In the process of network communication and data storage, it can not only ensure the security of the confidential information itself, but also hide the fact that the secret information is being transmitted and stored. As the main technology in the field of information hiding, digital steganography usually uses image, video, audio, text and other carriers to hide information.

In the process of digital image steganography, at least three subjects are involved: secret message, cover image and stego image. By modifying the cover image, the secret message is embedded into the cover image in a way that is difficult for humans and programs to detect, and finally the stego image is obtained. The ways to modify the cover mainly include three research directions: spatial domain, frequency domain and mixed domain. Among them, the spatial domain steganography supports a large capacity to embed the secret message, so this paper focuses on the algorithm related to the spatial domain and one of the main problem: imperceptible.

Traditional algorithms include: LSB replacement, LSB matching and STC (Syndrome-Trellis Codes) encoding. The LSB (least significant bits) is a typical spatial domain algorithm developed earlier, which hides secret messages by directly changing the value of cover information. That is, the secret is embedded in the least significant bit of a pixel in the cover image. The advantages of LSB are good transparency, fast embedding speed and large capacity. The disadvantage is poor robustness and weak anti-attack ability. The LSBM algorithm is an improvement of LSB. When the embedded secret message bit is the same as the lowest bit of the pixel value, the pixel value remains unchanged. If it is different, one is randomly selected to be added or subtracted. This algorithm removes the statistical asymmetry introduced by LSB replacement.

In the field of communication, convolutional codes and Viterbi decoding algorithms can use fewer bits to represent more information bits. The STC encoding method is similar to such convolutional codec algorithm. The STC algorithm consists of an encoding method, a decoding method, and a parity check matrix. The check matrix of STC is a striped matrix arranged by sub-matrices, avoiding the construction of high-dimensional linear extraction equations, optimizing based on local properties, eliminating the impossible construction route in advance, and finally selecting all the local extraction equations, and choose distorting of the construction route (Number of embeddings or distortion functions define metrics relevant to steganographic security) with the lowest sum [1, 2].

### 2. Methodology of the Research

This paper proposes an algorithm combining chaotic sequence and STC coding. Firstly, we use logistic function to shuffle secret message, and then use the STC method to embed it into the cover image to obtain the stego image. The algorithm proposed has distinctive characteristics by using logical functions to generate chaotic sequence. Chaotic sequence has excellent pseudo-randomness and uniform distribution. Since the generation of chaotic sequence only depends on the initial value and generation parameters, it is reversible, and the extraction algorithm is easy to solve. The detailed steps are shown below in Figures 1 and 2.

Algorithm 1	Embedding algorithm
1: Input: Cover image C of size $M \times N$ and secret message SE of size $m \times n$ .	
2: Output: Stego-image S.	
3: Begin	
<b>4: Perform logistic function to generate chaotic number sequence J of size <math>m \times n \times 8</math>.</b>	
5: Sort J by ascending order to generate a new sequence K.	
6: Calculate $X_i$ by the formula $(K_{i-1})/N + 1$ .	
7: Calculate $Y_i$ by the formula $K_i \bmod N + 1$ .	
8: Shuffle SE by coordinates of $X_i$ and $Y_i$ .	
9: Perform STC encoding method to the suffled SE and C to get S.	
10: End	

Figure 1 – Embedding Algorithm

Algorithm 2	Extracting algorithm
1: Input: Stego-image S of size $M \times N$ .	
2: Output: Secret message SE.	
3: Begin	
4: Perform STC decoding method to S to get suffled message SM.	
<b>5: Perform logistic function to generate chaotic number sequence J of size <math>m \times n \times 8</math>.</b>	
6: Sort J by ascending order to generate a new sequence K.	
7: Calculate $X_i$ by the formula $(K_{i-1})/N + 1$ .	
8: Calculate $Y_i$ by the formula $K_i \bmod N + 1$ .	
9: Shuffle SM by coordinates of $X_i$ and $Y_i$ to get SE.	
10: End	

Figure 2 – Extracting Algorithm

### 3. Experiment of the Research

This experiment firstly embeds secret messages of different sizes into different *cover* images to obtain the corresponding *stego* images; and then generates “*diff image*” – the difference between *cover* and *stego*, visualized as the positions of modified pixels. Data set includes multiple groups of 24-bit BMP images. Image types are divided into three categories by style: real photos, cartoon patterns and map textures. The size of *cover* is  $256 \times 256$  pixels. Four sizes of secret messages are used, which are 3.1%, 6.2% and 12.5% of the *cover*, respectively named *sm1*, *sm2*, and *sm4*. The results of the experiment are shown in Figure 3.

### 4. Conclusion

By comparing the visual effects of different covers and stegos in the experiment, the proposed algorithm has already well satisfied the imperceptibility in the case of large embedding capacity. By analyzing the embedding positions of secret messages of different sizes, it can be concluded that the secret is evenly distributed to most positions of the cover images, and at the same time it keeps unpredictable. Statistical results of LSB and proposed algorithm are shown in Table 1 below.

Table 1

Statistical Results of LSB and Proposed Algorithm

id	size of message	bits modified by lsb	modified rate of lsb	bits modified by stc	modified rate of stc	
0	1	196608	92502	0.470500	19648	0.099900
1	2	196608	92518	0.470600	21061	0.107100
2	3	196608	92321	0.469600	21110	0.107400
3	4	196608	91819	0.467000	20837	0.106000
4	5	196608	92342	0.469700	21117	0.107400
5	6	196608	92714	0.471600	20903	0.106300
6	7	196608	91997	0.467900	20899	0.106300
7	8	196608	92457	0.470300	21130	0.107500
8	9	196608	92105	0.468500	21149	0.107600

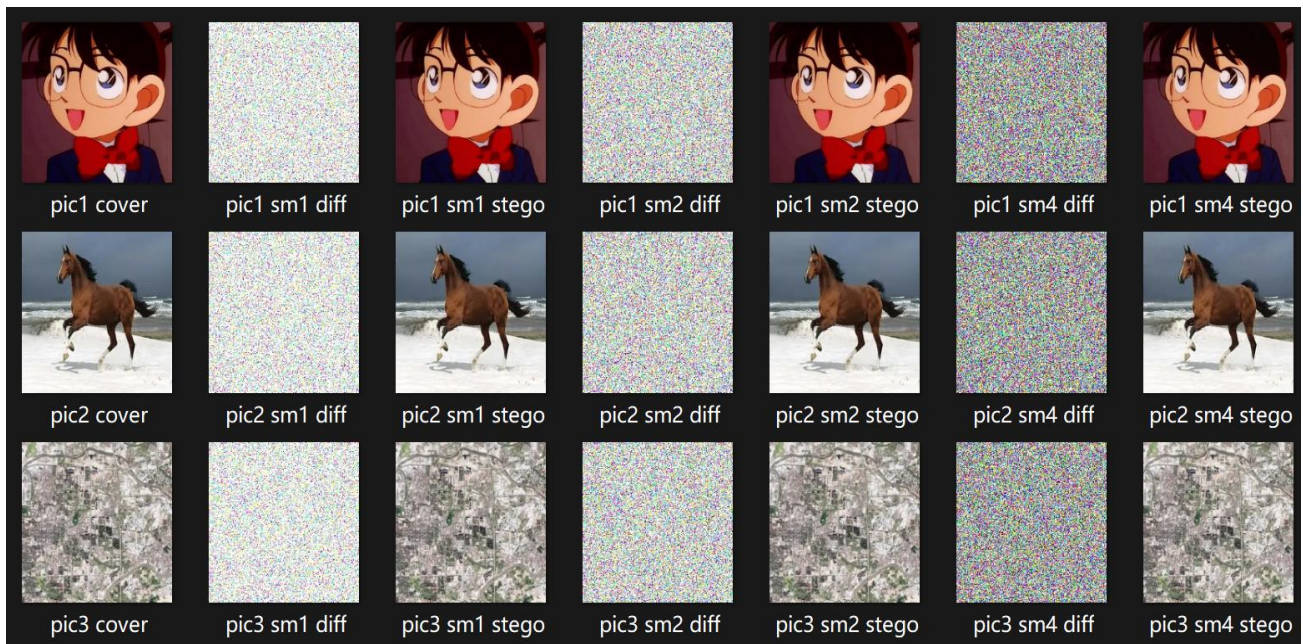


Figure 3 – Experimental Results of the Proposed Algorithm

### Reference

1. Tomas Filler, Jan Judas, Jessica Fridrich "Minimizing Embedding Impact in Steganography using Trellis-Coded Quantization", Proc. SPIE, Electronic Imaging, Media Forensics and Security XII, San Jose, CA, January 18-20, 2010.
2. Westfeld A.F5-A steganographic algorithm: High capacity despite better steganalysis [C]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001.289-302.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕПРЕССИВНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО МИМИКЕ ЛИЦА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В настоящее время депрессия является достаточно распространённым психическим заболеванием, которое важно быстро выявлять. В статье предложен алгоритм для определения депрессивного состояния человека по мимике лица с помощью нейросетевых технологий.

Депрессия – распространённое во всём мире заболевание, от которого, согласно Всемирной Организации Здравоохранения, страдает 3,8% населения [1]. Она может приводить к самым разным последствиям: от снижения работоспособности до попыток самоубийства. Депрессивное состояние характеризуется недостатком позитивных эмоций, ухудшением настроения, тоской, снижением концентрации, чувством вины, ненавистью к себе, нарушением сна, упадком сил, в самом худшем случае – апатией и многими другими симптомами.

Несмотря на существование известных и эффективных методов лечения психических расстройств, в частности, депрессии, более 75% людей в странах с низким и средним уровнем дохода не получают никакого лечения. К факторам, которые препятствуют получению эффективного лечения, относятся нехватка ресурсов, отсутствие подготовленных медицинских работников, социальная стигматизация людей, страдающих психическими расстройствами.

Традиционные подходы к диагностике депрессии в основном основаны на самоотчёте пациентов в клинических интервью, поведении, о котором сообщают родственники или друзья, и анкетах, таких как опросник здоровья пациента (PHQ-9) или использование шкалы депрессии Бека (BDI). Однако все они используют субъективные оценки, и как правило, их результаты противоречивы в разное время или в разной обстановке. Во время диагностики необходимо привлечь сразу несколько клинических экспертов для получения относительно объективной оценки [1].

Таким образом, создание автоматического бесконтактного и без участия больного способа определения депрессии может усовершенствовать диагностику и снизить потенциальный вред в его реальной жизни. Это можно сделать, например, с помощью программной или программно-аппаратной реализации в виде системы распознавания данного состояния.

Депрессивное состояние человека отражает его внутреннее эмоциональное состояние. Эмоции окрашивают все психические процессы человека, при этом являясь универсальным регулятором его внутренней и внешней жизни. Поэтому важно знать, какие эмоции выражает человек при нахождении в том или ином состоянии, в частности, при депрессии.

Задача распознавания эмоций требует в первую очередь выбор модели их представления. В настоящее время существует огромное количество различных таких моделей, например, трёхмерное пространство эмоциональных состояний по В. Вундту, шкала Г. Шлоссберга, и др. Однако наибольшую популярность завоевала модель Пола Экмана [2]. Он предложил модель базовых эмоций, которые присутствуют в репертуаре всех без исключения человеческих культур и которые в свою очередь относят к разряду человеческих универсалий. Они бывают положительными (радость и удивление) и отрицательными (гнев, грусть, страх, отвращение и, иногда, некоторые исследователи включают в этот список презрение).

Базовые эмоции характеризуются универсальными мимическими выражениями, причём эти выражения стабильны. Их можно различить даже у представителей далёких друг от друга культур. Имеется прочная связь между структурами мозга, ответственные за данные эмоции, и мышечной системой [3].

По этой причине модель Пола Экмана может успешно применяться для оценки эмоционального состояния человека по его изображению лица. Для этой задачи широко используются методы глубокого обучения (различные нейросетевые подходы).

Идея алгоритма заключается в распознавании депрессии с точки зрения того, какие эмоциональные состояния её характеризуют. Для этого можно использовать модель представления эмоций Пола Экмана. Можно выдвинуть гипотезу, что между базовыми эмоциями, которые выражает человек, а также депрессией есть некоторая связь (отображение).

**Алгоритм поиска отображения выглядит следующим образом:**

1. Разработать и обучить нейронную сеть для распознавания базовых эмоций на изображениях с лицами людей (например, используя датасет FER2013+ [4]).

Для этого шага была разработана и обучена свёрточная нейронная сеть на данных FER2013+. Датасет содержит более чем 29 000 изображений с лицами людей, разбитые на группы по следующим категориям эмоций: злость, отвращение, страх, радость, грусть, удивление и нейтральность. Обученная нейронная сеть на тестовой выборке имеет точность предсказания (ассигасу) более чем 85%. Если на вход подать изображение, на выходе нейронная сеть даёт для каждой категории эмоций вероятность того, что она присутствует. Результат можно условно преподнести как вероятность ввиду того, что на выходе в нейронной сети находится функция активации softmax, которая математически является функцией распределения случайной величины.

2. Используя выше обученную нейронную сеть, применить её для изображений с лицами людей, находящихся в депрессивном состоянии (например, используя датасет [5]).

Данный датасет содержит более 17 000 изображений с лицами людей, разбитый на две категории: есть депрессия / нет депрессии. Разработанная нейронная сеть была применена к этому датасету, что даёт к каждому изображению лица человека, находящегося в том или ином депрессивном состоянии также информацию о том, в каком эмоциональном состоянии он находится (какие базовые эмоции выражаются у него на лице)

3. Провести анализ результатов нейронной сети и выявить связь в проявлении депрессии.

Анализ данных заключается в том, чтобы построить гистограммы для каждой категории эмоций во время присутствия или отсутствия депрессии. Далее применить нормировку гистограмм, найти их разность по соответствующим категориям эмоций и перемножить полученные значения в карманах гистограммы на значение соответствующих карманов, принимающие значение от 0 до 1. Таким образом на выходе можно получить оценку связи базовых эмоций и депрессивного состояния.

4. Найти отображение базовых эмоций в депрессию.

Необходимо найти такое отображение (функцию), которое бы не просто линейно разделяло тестовую выборку согласно отображению, но также отражало степень уверенности в том, что человек, лицо которого изображено на фотографии, находится в депрессивном состоянии. Функцию можно подобрать также с помощью статистики, применив данные из п. 2. Такой функцией, например, может являться аффинно-преобразованное скалярное произведение вероятностей присутствия соответствующих эмоций на степени их влияния.

На рисунке 1 кратко представлен алгоритм в блочном виде.

**Пример работы программы, использующая алгоритм:**

На вход подаётся изображение с лицом человека, программа в процентном соотношении показывает, какие базовые эмоции присутствуют. На основе п. 4 алгоритма, находится отображение из «пространства базовых эмоций» в «пространство депрессии», тем самым, показывая, присутствует или отсутствует депрессия у человека, например, по уровню 0,8 (подбирается вручную также на основе п. 4 алгоритма).

На рисунке 2 представлен пример работы программы, использующей реализованный алгоритм.

## Секция 2. Прикладные проблемы информатики

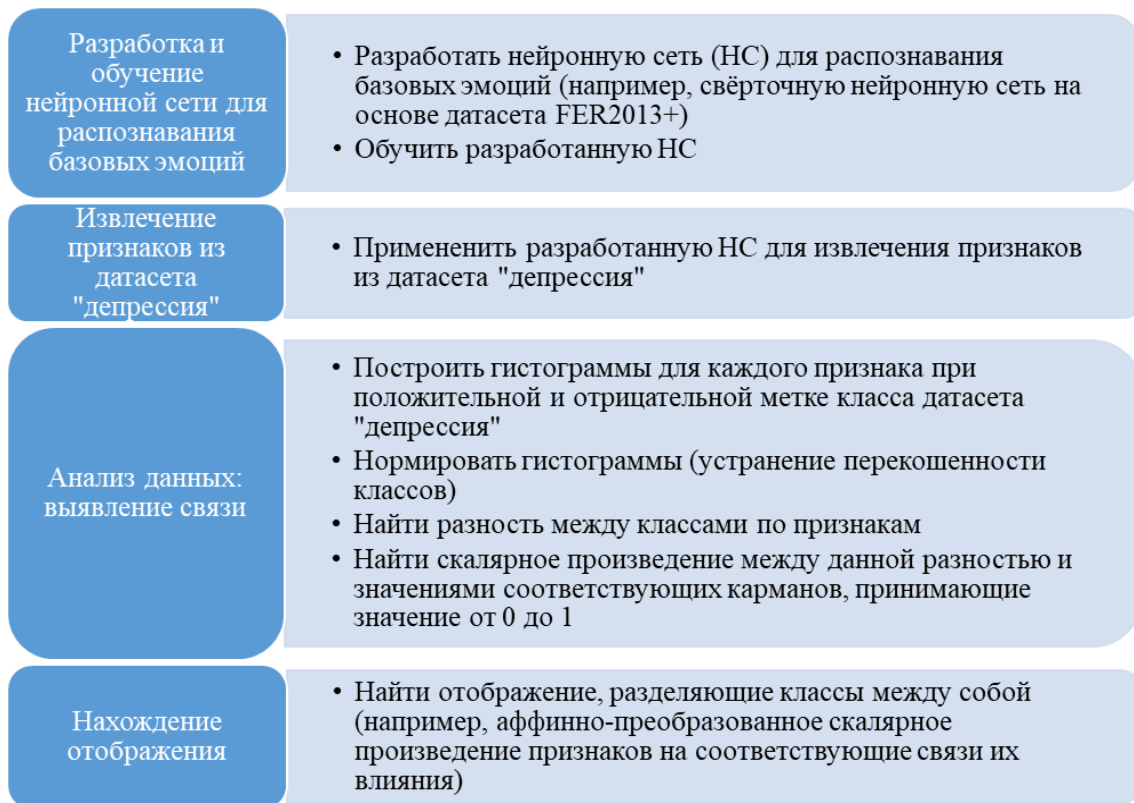


Рисунок 1 – Алгоритм поиска отображения

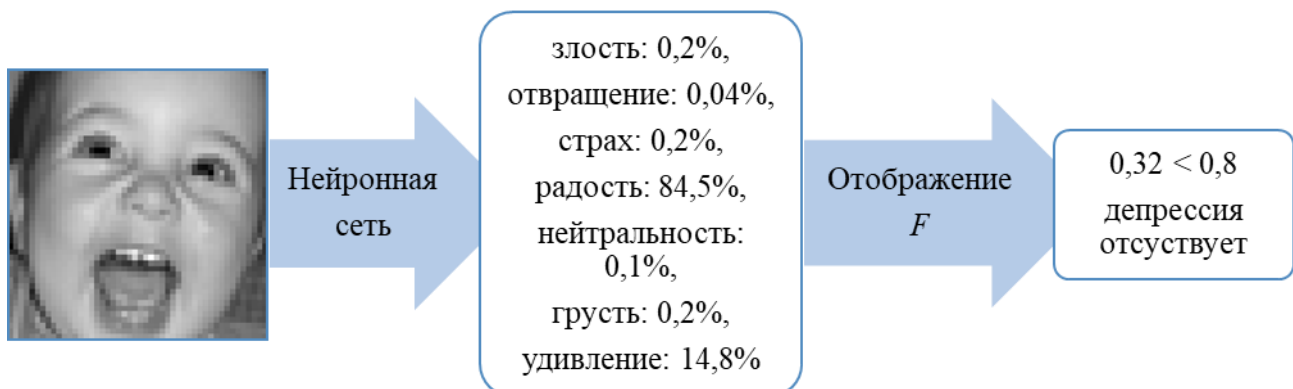


Рисунок 2 – Пример работы программы на основе алгоритма

**Выводы.** В результате исследования был разработан алгоритм для определения депрессивного состояния человека по мимике лица. Его особенностью является то, что выдвигается предположение о том, что между базовыми эмоциями, которые выражает человек, а также депрессией есть определенная связь.

### Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Депрессия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/ru/>. – Дата доступа: 12.04.2023.
2. Экман, П. Психология эмоций. Я знаю, что ты чувствуешь / Пол Экман. – СПб.: Питер, 2014. – 336 с.
3. Бутовская, М.Л. Язык тела: природа и культура / М.Л. Бутовская. – М.: Научный мир, 2004. – 440 с.
4. Fer2013Plus [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/subhaditya/fer2013plus>. – Дата доступа: 13.04.2023.
5. Depression dataset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kaggle.com/datasets/ishantewari/depression-detection>. – Дата доступа: 13.04.2023.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО БИОМЕТРИИ ЛИЦА**

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В настоящее время всё более широкое распространение получают биометрические системы идентификации человека. Они основываются на уникальных биологических характеристиках человека, которые трудно подделать и которые однозначно определяют конкретного человека. К таким характеристикам относятся отпечатки пальцев, форма ладони, узор радужной оболочки, изображение сетчатки глаза. Лицо и голос каждого человека также индивидуальны. Распознавание человека по изображению лица выделяется среди биометрических систем тем, что, во-первых, не требует специального дорогостоящего оборудования. Для большинства приложений персонального компьютера достаточно обычной видеокамеры, а почти все современные смартфоны имеют фронтальную камеру достаточно хорошего качества. Во-вторых, быстрое и удобное использование. В большинстве случаев достаточно просто пройти мимо или задержать лицо перед камерой на несколько секунд. В данной работе сравниваются готовые и доступные решения для распознавания человека по изображению лица с целью выбора наиболее оптимальной для использования в будущем проекте по разработке системы аутентификации пользователя по биометрии лица.

К основным классам решаемых задач распознавания человека по лицу на изображении или в видеопотоке можно отнести: поиск в больших базах данных, контроль доступа, получение информации о человеке. Они различаются как по требованиям, предоставляемым к системам распознавания, так и по способам решения. Различны и требования, предъявляемые к ошибкам первого и второго рода для таких классов. Ошибкой первого рода в данном случае называется ситуация, когда объект заданного класса не распознаётся системой. Ошибка второго рода происходит, когда объект заданного класса принимается за объект другого класса. Следует также отметить различие понятий верификации и идентификации. В задаче верификации неизвестный объект заявляет, что он принадлежит к некоторому известному системе классу. Система подтверждает или опровергает это заявление. В системах верификации ошибкой первого рода является ситуация, когда объект, принадлежащий к известным системе классам, принимается за объект, относящийся к неизвестным системе классам, и в доступе ему отказывают. Ошибка второго рода совершается, когда объект неизвестного класса принимается за объект, относящийся к известным системе классам, и ему разрешается доступ. При идентификации требуется отнести объект к одному из  $n$  известных классов или выдать заключение о том, что этот объект не относится к известным классам. При верификации критическими являются требования к ошибкам второго рода. Система не должна определять незнакомых людей как знакомых, возможно даже за счёт увеличения ошибок первого рода (отказов в доступе знакомым людям).

Все известные методы сходятся в том, что имеется набор изображений лиц заданной группы людей, к которому алгоритм обращается в процессе распознавания или изначально настраивается на него в процессе обучения. Одним из распространенных подходов к решению такой задачи является использование нейронных сетей, которые после обучения обладают хорошей обобщающей способностью. числовое значение.

Процесс распознавания лица на изображении (в видеопотоке) можно разделить на этапы [1]: 1) Детектирование и локализация лица на изображении; 2) Выравнивание изображения лица; 3) Вычисление вектора признаков; 4) Распознавание.

На каждом этапе используются различные методы их решения. Они могут различаться по затраченному времени и точности выполнения. по входным данным.

В работе сравнения подходов к распознаванию делались с использованием языка программирования Python. Тесты проводились на различных датасетах изображений и видео.

Для детектирования лиц на изображениях и видео сравнивались следующие методы: Виолы-Джонса [2], Histogram of Oriented Gradients (HOG), нейронные сверточные сети (Single Shot MultiBox Detector (SSD), MTCNN, RetinaFace, MediaPipe)



**Датасет по подсчету числа лиц на фотографии.**

Данный датасет содержит более 8000 фотографий с разным количеством людей на них. Также на фотографиях лица людей могут находиться под разными углами. Такой датасет применяется для обучения моделей по поиску лиц на фотографиях. Суммарно лиц на всех фотографиях — 24533. Результаты работы с этим набором данных представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты работы методов по подсчету лиц на фото

Метод	Найдено лиц всего, %	Найдено лиц на одном фото в среднем, %	Времени затрачено на весь датасет, с	Времени на обработку одного фото в среднем, с
Виолы-Джонса	41.66	44.13	388.48	0.047
HOG	63.70	67.95	1275.25	0.16
SSD	46.23	51.59	279.40	0.034
MTCNN	93.15	94.51	4203.33	0.51
RetinaFace	98.92	99.23	1485.12	0.181
Mediapipe(RGB)	35.47	44.55	70.76	0.008

Скорость обработки изображений у метода Mediapipe самая высокая, что очень важно при обработке потокового видео, хотя результаты обнаружения лиц не выглядят впечатляюще по сравнению с, например, методом RetinaFace. Из-за слишком низкой скорости MTCNN по сравнению с RetinaFace, которая имеет большую точность, было принято решение не использовать этот метод в сравнениях на других датасетах.

**Датасет фотографий приближенных лиц под разными углами.**

Содержит 6000 фотографий лиц небольшого числа людей, которые повернуты под разными углами к объективу камеры. Разрешение фотографий 200×200 пикселей. На каждой фотографии присутствует только одно лицо, а сама съемка сделана на фронтальную камеру телефона. В ходе исследований установлено, что некоторые методы отработали быстрее, что связано с малым разрешением самих фотографий. Точность Mediapipe на данном датасете лучше по сравнению с предыдущим.

**Видео лиц, поворачивающихся на разные углы.**

Видео сняты на фронтальную камеру телефона. На каждом присутствует только один человек, который поворачивает голову в разных направлениях. Разрешение видео — 750×630, частота кадров в секунду — 30.54, общая продолжительность всех видео — 229 секунд. Результаты показали большую точность Mediapipe, а также его высокую скорость.

Таким образом, для решения задачи детектирования мной был выбран метод детектирования из фреймворка Mediapipe. Он очень быстр и детектирует лицо на 99% кадров на видео с интервью в разных разрешениях (144p, 240p, 360p, 480p, 720p, 1080p) и видео, снятых на фронтальную камеру. Нагружает процессор среднего сегмента AMD Ryzen 5 2600 всего на 20% в пике. А также сами веса нейронной сети занимают в памяти компьютера менее 90 МБ. видео.

**Получение вектора признаков и распознавание.**

Для получения вектора признаков использовались следующие нейронные сети: ArcFace, Facebook DeepFace, DeepID, Dlib Face Recognition, Google Facenet, Facenet512, OpenFace, VGG-Face. Выбор обусловлен открытостью использования нейронных сетей, разнообразием архитектур выбранных сетей, разнообразием датасетов, на которых обучались сети. Для полученных векторов вычислялось как косинусное, так и евклидово расстояние [3]. Сравнение нейронных сетей производилось на датасете из 2000 фотографий лиц 16 людей при разных ракурсах и разных углах поворота головы. Анализ результатов исследования по идентификации лица человека, что сети DeepFace и Dlib работают медленно, что неприемлемо при работе с потоковым видео. Сеть SFace показывает высокую производительность, но имеет слишком большую вероятность ошибок второго рода, что неприемлемо для систем верификации. Далее для проверки выбран небольшой датасет из видео с интервью разных людей. Для детектирования лица использовалась нейросеть Mediapipe. По результатам эксперимента хорошо себя показала Facenet512. Она также, как и на датасете фотографий лиц, имела практически не имела ошибок второго рода. А процент ошибок первого рода был минимален. Скорость обработки видео у системы с данной сетью позволяет эффективно обрабатывать более 15 изображений лиц в секунду.

### Выводы

В качестве метода для детектирования лица на изображении наилучшим образом себя зарекомендовала мобильная нейронная сеть Mediapipe. Она обладает высокой скоростью обработки изображений, с высокой вероятностью детектирует лицо, расположенное под небольшими углами к объективу камеры, минимально нагружает процессор среднего класса и требует небольшого количества памяти, которое занимают веса данной сети. Для вычисления вектора признаков наилучшим решением оказалась сверточная нейронная сеть Facenet512, поскольку длина её выходного вектора не слишком велика по сравнению с DeepFace и VGG-Face, что позволит быстро вычислять расстояние между сравниваемыми векторами. Также у данной сети низкие вероятности ошибок первого и второго рода, что особенно важно в контексте систем верификации, где требуется минимальность ошибки второго рода.

### Список литературы

1. Татаренков Д. А., Анализ методов обнаружения лиц на изображении (2015) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/84/15524/> – Дата доступа: 10.04.2023.
2. P. Viola and M. J. Jones, «Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features», proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001), 2001 [Electronic resource] – Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/990517> – Date of access: 10.04.2023.
3. M., Deza, E. Encyclopedia of Distances — Fourth Edition. — Springer, 2016. [Electronic resource] – Mode of access: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-52844-0> – Date of access: 10.04.2022.

## ОБНАРУЖЕНИЕ САЙТОВ ОДНОНУКЛЕОТИДНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИИ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В работе предложен метод обнаружения однонуклеотидных полиморфизмов на основе вычисления энтропии сайтов геномной ДНК. Эффективность разработанного алгоритма подтверждена в ходе анализа экспериментальных данных геномного секвенирования.

**Введение.** Генетический полиморфизм влияет на фенотип человека и других живых организмов 6. Однонуклеотидные полиморфизмы (SNP, от англ. single nucleotide polymorphism) являются одним из наиболее распространенных типов генетических вариаций в геноме человека. Знание генов, участвующих в развитии рака, в сочетании с возможностью секвенирования генов и биоинформатического анализа, является важным инструментом скрининга пациентов с риском и помощи в генетическом консультировании 2. Среди существующих способов определения сайтов SNP следует отметить методы подсчета числа покрытий (ридов), точного теста Фишера, критерия хи-квадрат, биномиального отношения правдоподобия 6. Методы достаточно универсальны и просты для программной реализации, однако вычислительно затратные и трудно применимы при анализе экспериментальных данных с высоким уровнем шума (небольшой глубиной секвенирования), что часто наблюдается в данных геномного секвенирования, полученных с помощью технологий PacBio и Oxford Nanopore 3. Критерии на основе энтропии широко используются в ходе анализа данных геномного секвенирования, в основном для решения задач ассоциаций областей генома и выявления мутаций при заболеваниях 4. Однако для прямой идентификации сайтов SNP по данным отдельного эксперимента секвенирования генома метод энтропии не используется. Критерии на основе энтропии могут иметь преимущества в точности и эффективности при анализе экспериментальных данных с невысоким числом покрытий и более вычислительно эффективны в сравнении с существующими статистическими методами.

В работе предложен метод обнаружения однонуклеотидных полиморфизмов на основе вычисления энтропии сайтов геномной ДНК. Для оценки эффективности предложенного метода проведено его сравнение с точным тестом Фишера и тестом биномиального отношения правдоподобия на примерах опубликованных экспериментальных данных геномного секвенирования.

**Определения SNP на основе вычисления энтропии нуклеотидного сайта.** Введем меру энтропии сайта

$$E = \sum f_r^i \ln f_r^i, \quad (1)$$

где  $f_r^i$  – нормированная к общему числу покрытий частота нуклеотида  $r$  в позиции рассматриваемого сайта.

В случае, если сигналы источников искажений, вносящие неопределённости в оценку числа нуклеотидных оснований в экспериментах геномного секвенирования, распределены нормально, то для описания вероятностного распределения величины энтропии можно предположить распределение хи-квадрат 5. Для расчетной статистики распределения хи-квадрат воспользуемся выражением  $2 \cdot n \cdot E$  6, где  $n$  – число покрытий сайта. Для оценки значимости необходимо задать число степеней свободы  $\nu$  равным 4, числу параметров, представленных количеством нуклеотидных оснований, изменяющихся при вычислении энтропии. Для расчётной статистики вычислим  $p$ -величину

$$p = \int_{2nE}^{+\infty} \frac{(1/2)^{\nu/2}}{\Gamma(\nu/2)} u^{\nu/2-1} e^{-u/2} du, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – обозначение гамма-функции.  $p$ -Величина представляет собой вероятность того, что случайная величина, имеющая распределение хи-квадрат, примет значение не меньше по абсолютной величине, чем наблюдаемое  $2 \cdot n \cdot E$ . При формировании гипотез  $H_0: E = 0$  и  $H_1: E > 0$ , если  $p > \alpha/2$ , где  $\alpha$  – уровень значимости критерия, то гипотеза  $H_0$  принимается. Например, взяв  $\alpha = 0,05$  сайт будет идентифицирован как SNP если  $p$ -величина для расчётной статистики  $2 \cdot n \cdot E$  меньше  $\alpha$ .

Приведенный метод не учитывает ситуацию, когда максимальное число покрытий приходится на неререференсный нуклеотид. В работе предлагается способ решения данной задачи, суть которого состоит в награждении (числом покрытий) нуклеотида референсного генома и штрафе (числом покрытий) для неререференсного нуклеотида в половины от числа покрытий неререференсного нуклеотида, так чтобы общее число покрытий оставалось неизменным. Последнее предполагает допустимость применения распределения хи-квадрат при оценке значимости энтропии сайта.

Для программной реализации алгоритма необходимо задать пороговое значение для числа прочтений  $T_n$  и уровень значимости критерия  $\alpha$ . Отфильтровываются сайты, число покрытий  $n$  которых ниже порогового значения  $T_n$ . Алгоритм идентификации сайта включает вычисления величины энтропии  $E$  и  $p$ -величины. Если  $p < \alpha/2$ , то сайт определяется как SNP.

**Экспериментальные данные для сравнительного анализа алгоритмов идентификации сайтов SNP.** В работе рассмотрены экспериментальные данные, полученные консорциумом GIAB 7. Выбор данных GIAB обусловлен тем, что на сегодняшний день это наиболее надежные бенчмарк-данные для решения задач, связанных с изучением геномного полиморфизма у человека (от разработки новых инструментальных методов «мокрой» биологии до сравнения алгоритмов обнаружения полиморфных сайтов).

**Результаты.** Выполнен анализ экспериментальных наборов данных на основе разработанного энтропийного теста (ЭТ), модифицированного точного теста Фишера (МТТФ) из R-пакета *Rsubread* 8 и теста биномиального отношения правдоподобия (ТБОП) из R-пакета *VariantTools* 9. Эффективность алгоритмов оценена с помощью мер точности *Precision* ( $P$ ), чувствительности *Recall* ( $R$ ) и счета *F1 score*  $F_1$  ( $F_1$ ), характеризующих свойства алгоритмов не включать ложноположительные события ( $P$ , неверно классифицированные сайты как SNP), истинно положительные события ( $R$ , верно классифицированные как SNP) и их комбинированного вклада ( $F_1$ ) 10. Результаты идентификации сайтов SNP для 5 наборов по 20 000 сайтов, считанных с позиций номер 3, 9, 15, 21, и  $27 \times 10^6$  в хромосомах 10 и 22, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Точность алгоритмов ЭТ, МТТФ и ТБОП

$i^1$	Хромосома 10									Хромосома 22								
	ЭТ			МТТФ			ТБОП			ЭТ			МТТФ			ТБОП		
	$R$	$P$	$F_1$	$R$	$P$	$F_1$	$R$	$P$	$F_1$	$R$	$P$	$F_1$	$R$	$P$	$F_1$	$R$	$P$	$F_1$
3	100	100	100	95.0	100	97.4	100	20.2	33.6	75.0	9.7	17.2	50.0	6.7	11.8	75.0	2.3	4.5
9	56.6	8.3	14.5	79.2	4.7	8.9	79.2	4.7	8.9	97.3	97.3	97.3	89.2	100	94.3	100	37.0	54.0
15	100	88.9	94.1	96.9	96.9	96.9	100	25.6	40.8	100	91.7	95.7	87.9	93.5	90.6	100	25.8	41.0
21	100	94.1	97.0	96.9	96.9	96.9	100	37.2	54.2	100	70.8	82.9	94.1	88.9	91.4	100	10.3	18.7
27	100	93.9	96.9	96.8	96.8	96.8	100	37.3	54.3	100	80.0	88.9	100	95.2	97.5	100	28.2	44.0
с.з. <sup>2</sup>	91.3	77.0	<b>80.5</b>	93.0	79.1	<b>79.4</b>	95.8	25.0	<b>38.4</b>	94.5	69.9	<b>76.4</b>	84.2	76.9	<b>77.1</b>	95.0	20.7	<b>32.4</b>

<sup>1</sup>  $i, \times 10^6$  – номер первой позиции набора из 20 000 сайтов в хромосомах 10 и 22;

<sup>2</sup> с.з. – среднее значение

ЭТ не ниже в оценке меры  $F_1$ , чем МТТФ и значительно превосходит ТБОП при анализе данных консорциума GIAB. Однако для МТТФ характерно снижение точности идентификации сайтов SNP при повышении порога числа покрытий  $T_n$  11. В работе дополнительно выполнен анализ данных с высоким экспериментальным шумом (малым числом покрытий сайтов), результаты которого свидетельствуют о превосходстве ЭТ. Следует отметить, что в ЭТ не требуется ручной подбор пороговых значений параметров, он является автоматизированным, а также предоставляет  $p$ -величины статистического критерия, что неприменимо в сравниваемых методах.

**Заключение.** В работе предложен новый метод определения однонуклеотидного полиморфизма на основе вычисления энтропии сайта, позволяющий повысить эффективность определения однонуклеотидного полиморфизма в молекулах ДНК по данным геномного секвенирования. Работоспособность алгоритма подтверждена в ходе сравнительного анализа с наиболее эффективными из существующих алгоритмов на примерах экспериментальных данных. Наилучшие результаты получены для метода на основе энтропии; менее значимые – для модифицированного критерия Фишера; наихудшие – для теста биномиального отношения правдоподобия. Разработанный метод имеет преимущества в точности при анализе экспериментальных данных с невысоким числом покрытий и предоставляет  $p$ -величины для автоматического или интуитивно понятного ручного подбора пороговых значений статистических параметров при определении значимости сайтов SNP.

#### Список литературы

1. Sung, W.-K. Algorithms for next-generation sequencing / W.-K. Sung. – 1<sup>st</sup> ed. – Chapman & Hall/CRC. – 2017. – 350 p.
2. Kappelmann-Fenzl, M. Next Generation Sequencing and Data Analysis / ed. M. Kappelmann-Fenzl. – Cham : Springer. – 2021. – 218 p.
3. Masoudi-Nejad, A. Next Generation Sequencing and Sequence Assembly. Methodologies and Algorithms / A. Masoudi-Nejad, Z. Narimani, N. Hosseinkhan. – New York : Springer. – 2013. – 86 p.
4. Optimal Design of Low-Density SNP Arrays for Genomic Prediction: Algorithm and Applications / X. L. Wu [et al] // PLoS One. – 2016. – Vol. 11, iss. 9 : e0161719.
5. An Entropy-Based Approach for Testing Genetic Epistasis Underlying Complex Diseases / G. Kang [et al] // J. Theor. Biol. – 2008. – Vol. 250, iss. 2. – P. 362-74.
6. de Andrade, M. Entropy Based Genetic Association Tests and Gene-Gene Interaction Tests / M. de Andrade, X. Wang // Stat. Appl. Genet. Mol. Biol. – 2011. Vol. 10, iss. 1 : 38.
7. Zook, J. M. An Open Resource for Accurately Benchmarking Small Variant and Reference Calls / J. M. Zook [et al] // Nature Biotechnology. – 2019. – Vol. 37, iss. 5. – P. 561-566.
8. Liao, Y. The R Package Rsubread is Easier, Faster, Cheaper and Better for Alignment and Quantification of RNA Sequencing Reads / Y. Liao, G. K. Smyth, W. Shi // Nucleic Acids Research. – 2019. – Vol. 47 : e47.
9. VariantTools: Tools for Exploratory Analysis of Variant Calls. [Electronic resource]. – URL: <https://www.bioconductor.org/packages/release/bioc/html/VariantTools.html> (date of access: 10.03.2023).
10. Murphy, K. P. Probabilistic Machine Learning / K. P. Murphy. – London : The MIT Press, 2022. – 854 p.
11. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения сайтов однонуклеотидных вариаций / Я. В. Шинкевич [и др.] // Информационные системы и технологии = Information Systems and Technologies [Электронный ресурс] : материалы междунар. науч. конгресса по информатике. Ч. 2, Респ. Беларусь, Минск, 27–28 окт. 2022 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2022. С. 61–66.

## **КОНТРОЛЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ НАХОЖДЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

В настоящее время происходит бурное развитие технологий взаимодействия компьютера и человека. Порой, интеграция таких технологий может быть весьма непредсказуемой. Виртуальная реальность и средства ее достижения – не исключение. Данная технология «обманывает» мозг человека. Движение и положение тела в пространстве фиксируется вестибулярным аппаратом, который подает сигналы в мозг. Но вместе с этим в мозг поступает еще и зрительная информация. Показатели могут расходиться, поэтому человек во время нахождения в виртуальной реальности может испытывать различные недомогания, такие как головокружение, головная боль, тошнота. Этому способствуют различные стрессовые ситуации, которые присутствуют в некоторых виртуальных сценах. Соответственно необходимо контролировать состояние человека во время нахождения в виртуальной реальности. Однако данный процесс необходимо автоматизировать, привлекая различные средства мониторинга здоровья. Нужно учесть тот факт, что не все медицинские приспособления могут подойти для контроля показателей организма человека в виртуальной реальности. С помощью средств мониторинга здоровья было разработано приложение для контроля и прогнозирования частоты сердечных сокращений человека.

**Введение.** Виртуальная реальность (VR) – информационная технология, которая позволяет создавать у людей иллюзии наблюдения и ощущения какого-то искусственного мира, создаваемого при помощи средств информатики и кибернетики. [3]

Виртуальная реальность помещает участников в многомерную компьютерную виртуальную среду (VE), создавая иллюзию пребывания внутри искусственного мира, а также предоставляя способность действовать там. Технология VR позволяет заменить тело участника виртуальным телом, видимым от первого лица. Для полного погружения нужны визуальные, слуховые и тактильные устройства вместе с системой слежения, чтобы информационная технология могла доставить участнику иллюзию нахождения в каком-то месте и то, что происходит в этом месте. [3]

**Средства мониторинга здоровья.** В 90-е года 20 века была создана технология, которая позволяла удаленно контролировать физиологические показатели человека. Устройства для удаленного мониторинга здоровья (Wearable health devices, WHDs) – это совокупность средств, предназначенных для непрерывного амбулаторного контроля жизненно-важных показателей здоровья человека в повседневной жизни (во время работы, дома, при занятиях спортом) или в условиях клиники [2]. Их преимущество – минимизация дискомфорта и вмешательства в обычную жизнедеятельность человека.

Для того, чтобы контролировать состояние человека, можно выбрать наиболее информативные показатели: ЧСС, артериальное давление, температура тела, гемоглобин и др. Так или иначе, данные показатели связаны между собой и изменение одних приводит к изменению других. Следовательно, чтобы контролировать наличие непредсказуемых изменений состояния человека, можно в некоторых случаях ограничиться измерением ЧСС. В качестве устройств съема показателей был выбран фитнес-браслет, который работает по протоколу Bluetooth Low Energy (BLE) [2].

**Беспроводная система регистрации и передачи данных.** Bluetooth Low Energy (BLE) – это беспроводная технология связи. Данная технология ориентирована на применение в системах мониторинга и сбора данных с автономным питанием. Концепция технологии направлена на оптимизацию минимального энергопотребления, на уменьшение пикового тока передачи и времени приема за счет коротких пакетов.

Стек BLE со стоит из двух основных частей: контроллера и узла сети. Контроллер реализуется в виде системы на кристалле (СНК) и включает в себя физический и канальный уровни. [1]

Узел сети реализован на микроконтроллере приложений и включает в себя протокол адаптации (Adaptation Protocol - L2CAP), протокол атрибутов (Attribute Protocol - ATT), протокол атрибутов профилей устройств (Generic Attribute Profile - GATT), протокол обеспечения безопасности (Security Manager - SM), протокол обеспечения доступа к функциям профиля устройств (Generic Access Profile (GAP)). Взаимодействие между контроллером и узлом сети осуществляется с помощью Host Controller Interface (HCI). [1]

Совокупность BLE устройств можно использовать для построения гибкой сенсорной сети, с целью получения различных физиологических показателей человека в реальном времени.

**Построение приложения для взаимодействия с BLE-устройством.** Архитектура BLE представляет собой стек протоколов, где большое внимание уделяется протоколу доступа к атрибутам и самим атрибутам. Центральное устройство должно знать, что существует периферийное устройство для связи с ним. Поэтому периферийное устройство будет рекламировать свое присутствие в широкопередаточном режиме BLE. В этом режиме устройство использует профиль общего доступа (GAP) для отправки небольшого количества информации – «рекламы» с постоянной скоростью.

После обнаружения обмен данными между устройствами выполняется с помощью протокола Generic Attribute (GATT). [1]

BLE-устройство располагает базой данных переменных состояния, где эти переменные группируются в службы на основе функциональности. Обычно, данные переменные называют «характеристиками» (см. рис. 1). Характеристика полностью определяется ее объявлением, значением и дескриптором:

- Объявление содержит данные о характеристике, такие как универсальный уникальный идентификатор (UUID).
- Значение представляет собой «полезную» часть характеристики: это значение, которое содержит данные, которые анализируются.
- Дескриптор не является обязательным; его можно использовать для предоставления дополнительной информации о характеристике или для контроля ее поведения.

API-интерфейсы Bluetooth GATT для устройств с низким энергопотреблением предоставляют доступ к объектам и функциям, а не собственно к механизмам передачи. [1]

Прежде чем, получить список служб и характеристик устройства, необходимо провести аутентификацию. Аутентификация состоит из следующих шагов:

1. Настройка auth-уведомлений (для получения ответа) посредством отправки двухбайтового запроса  $\backslash\text{x01}\backslash\text{x08}$  в Des (Notification descriptor).
2. **Отправка 16-байтового ключа шифрования** в Char (Auth Characteristic) с командой и добавление двух байт  $\backslash\text{x01}\backslash\text{x08}$  + KEY.
3. Запрос случайного ключа с устройства с командой посредством отправки двух байт  $\backslash\text{x02}\backslash\text{x08}$  в Char.
4. *Получение случайного ключа от устройства (последние 16 байт).*
5. *Шифрование этого случайного номера при помощи 16-байтового ключа, используя алгоритм шифрования AES/ECB/NoPadding (из Crypto.Cipher import AES) и обратная отправка в Char ( $\backslash\text{x03}\backslash\text{x08}$  + закодированная информация).*

После аутентификации можно перейти к следующему шагу – обнаружению данных, предоставляемых устройством.

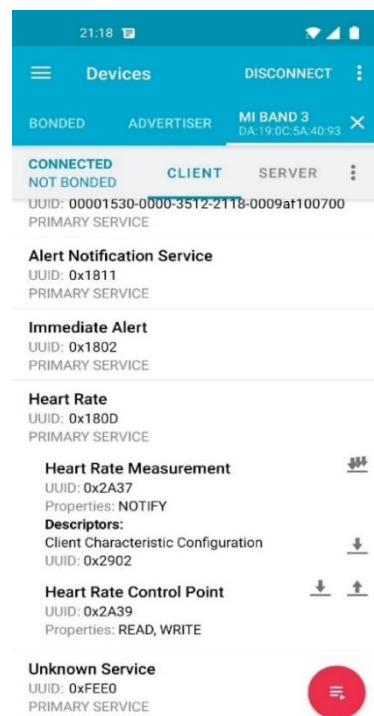


Рисунок 1. Службы и характеристики Mi Band 3

Так как в качестве устройства для мониторинга ЧСС будет использоваться фитнес-браслет Mi Band 3, необходимо убедиться, что к нему можно подключиться и у него существует все службы и характеристики, необходимые для достижения поставленной цели.

**Результаты.** С помощью средств мониторинга здоровья было разработано приложение для контроля и прогнозирования частоты сердечных сокращений человека. [4]

В ходе первого вида испытания была использована игровая сцена, где есть микрострессовые ситуации, а также небольшая физическая активность пользователя. Можно было заметить, что у пользователя был достаточно стабильный пульс до включения сцены, то есть, когда он не находился в виртуальной реальности. После включения сцены пульс человека стабильно рос, однако позже организм начинал адаптироваться к новым условиям.

Также были проведены эксперименты, в которых 2 человека находились в одинаковой сцене. Можно было сделать вывод о том, что виртуальная реальность оказывает разное воздействие на различных людей, находящихся в одной и той же сцене. Поэтому, чтобы контролировать состояние человека необходимо подбирать индивидуальные параметры, что было реализовано в приложении. Под индивидуальными параметрами можно рассматривать возраст, а также ЧСС покоя и др. [4]

Большинство данных, которые связаны с аритмией, представляет собой временной ряд. Существует большое количество статистических методов анализа составляющих временного ряда и его прогнозирования. В ходе эксперимента был спрогнозирован ход изменений ЧСС человека во время нахождения в виртуальной реальности с помощью различных моделей машинного обучения. В качестве моделей были выбраны наивная, экспоненциальная, линейная регрессия и метод гусеницы (SSA). Наиболее подходящими моделями в нашем случае будут являться линейная регрессия и SSA, которые показали более точные и правдоподобные результаты. В целом, благодаря прогнозированию можно не только предсказывать значения ЧСС человека, но и динамически регулировать состояние виртуальной сцены, если она это позволяет.

**Выводы.** В результате исследования был проведен контроль пульса человека в обычном состоянии и во время нахождения в виртуальной реальности. Было установлено, что пульс человека может значительно учащаться, когда он находится в виртуальной реальности. При этом могут существовать различные виртуальные стрессовые ситуации, когда пульс может резко подскочить в несколько раз. Поэтому необходимо контролировать состояние человека, чтобы свести вред виртуальной реальности к минимуму. Также удалось спрогнозировать пульс человека на основе нескольких моделей машинного обучения, что позволяет, с одной стороны, предсказать состояние человека в ближайшее время и скоординировать ряд действий по предотвращению рисков.

Результаты данной работы по контролю ЧСС человека в виртуальной реальности могут быть применены для создания классификации сцен виртуальной реальности по степени их влияния на организм человека.

#### Список литературы

1. Калачев, А. В. Основы работы с технологией Bluetooth Low Energy : учебное пособие / А. В. Калачев, М. В. Лапин, М. Е. Пелихов. – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 224 с.
2. Кухаренко, И. А. Анализ способов съема частоты сердечных сокращений для применения в носимых устройствах / И. А. Кухаренко // Инновации в науке: материалы Международ. научн. конф., Национ. техн. ун-т Украины, КПИ. – Киев, 2016. – С. 66-71.
3. Spanlang B, Normand J-M, Borland D, Kilteni K, Giannopoulos E, Pomés A, González-Franco M, Perez-Marcos D, Arroyo-Palacios J, Muncunill XN and Slater M (2014) How to build an embodiment lab: achieving body representation illusions in virtual reality, 2014: 1-20 HeartRateMonitor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/LoySander/HeartRateMonitor/tree/development>. – Дата доступа: 01.05.2022.



**СЕКЦИЯ 3.**

**ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
РАДИОФИЗИКИ**

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе приведены результаты адаптации методов цифровой обработки изображений для оценки параметров структур, изображения которых формируются в результате физического эксперимента. Продемонстрирована возможность обработки компонентов освещенности и коэффициента отражения по отдельности, в частности, показано изменение частотной составляющей коэффициента отражения без влияния на частотную составляющую освещенности из-за предварительного логарифмического преобразования при гомоморфной фильтрации. Это позволяет значительно подавлять шумы при одновременном выделении четких контуров структур на изображениях растровой электронной микроскопии. Установлено, что при использовании адаптивного подбора апертуры медианного фильтра сохраняются резкие границы объектов, эффективно подавляются некоррелированные или слабо коррелированные помехи и малоразмерные детали, что важно для анализа данных просвечивающей оптической микроскопии. Показано, что для целей определения размеров и формы объектов на изображениях физического эксперимента перспективными являются методы нелинейной гомоморфной и медианной фильтрации и нелинейных преобразований Хафа и Канни.

В результате выполнения целого ряда физических экспериментов, например, на основе электронной и оптической микроскопии, формируются потоки данных в виде матриц или тензоров, которые могут быть интерпретированы как изображения. Для оценки параметров объектов (размеров, формы) на формируемых экспериментальных изображениях перспективно использовать методы обработки изображений [1]. Однако типично для обработки растровых фотографий ставятся цели, отличные от требований оценки параметров объектов физических структур [2]. По этой причине адаптация методов цифровой обработки изображений физического эксперимента для оценки параметров структур является весьма актуальной задачей. В настоящее время для целей определения размеров и формы объектов на изображениях физического эксперимента перспективными являются методы нелинейной гомоморфной и медианной фильтрации и нелинейных преобразований Хафа и Канни [3, 4].

В общем случае гомоморфные фильтры находят применение в тех приложениях, где выходной сигнал формируется в виде произведения двух различных сигналов [3]. Применительно к данным микроскопии изображение может быть представлено в виде произведения освещенности и коэффициента отражения. С помощью гомоморфных фильтров возможно обрабатывать отдельно компоненты освещенности и коэффициента отражения: изменять частотную составляющую коэффициента отражения, не влияя на частотную составляющую освещенности из-за предварительного логарифмического преобразования. После логарифмирования вместо произведения компонентов формируется сумма, затем используются стандартные методы фильтрации изображения. На рисунке 1 приведено изображение торца оптического волокна, полученное с помощью растровой электронной микроскопии, до (слева) [5] и после (справа) гомоморфной фильтрации. Видно, что в результате обработки оказались значительно подавлены шумы, а контуры структур стали четкими.

Специфической особенностью медианных фильтров является избирательность по отношению к элементам матрицы, представляющим собой немонотонную составляющую массива элементов в пределах окна (апертуры) фильтра, которые резко выделяются на фоне соседних отсчетов [6]. Это позволяет подавлять выбросы, связанные, например, со спеклами или бликами на изображениях с оптических микроскопов. На монотонную составляющую последовательности отсчетов яркости медианный фильтр не действует, оставляя её без изменений. При использовании адаптивного подбора апертуры (размера окна обработки) без искажений сохраняются резкие границы объектов, эффективно подавляются некоррелированные или слабо коррелированные помехи и малоразмерные детали.

На рисунке 2 приведено изображение микроструктуры, полученное с помощью просвечивающей оптической микроскопии, до (слева) и после (справа) медианной фильтрации.

Видно, что в результате обработки изображений произошло четкое выделение границы объектов на изображении.

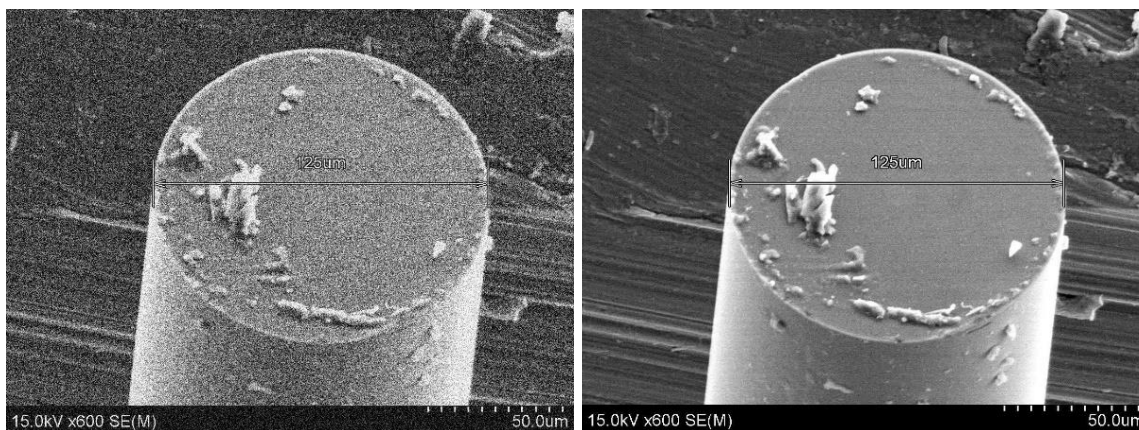


Рисунок 1 – Изображение торца оптического волокна, полученное с помощью растровой электронной микроскопии, до (слева) и после (справа) гомоморфной фильтрации

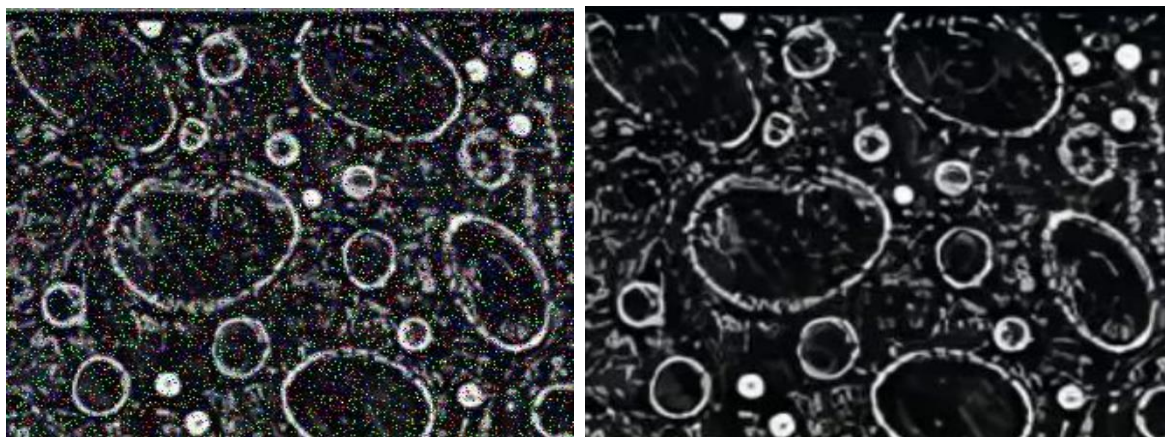


Рисунок 2 – Изображение микроstructures, полученное с помощью просвечивающей оптической микроскопии, до (слева) и после (справа) медианной фильтрации

Для поиска на изображении с оптического микроскопа прямолинейных отрезков и дуг окружностей эффективно использовать преобразование Хафа [7], которое позволяет указать параметры семейства кривых на основе формирования в фазовом пространстве окружностей с центрами во всех непустых точках изображения и дальнейшего поиска локальных максимумов с помощью пороговой сегментации или поэтапного исключающего поиска глобального максимума.

Далее на основе детектора Канни оказывается возможно выделить границы структуры на изображении с оптического микроскопа по следующему алгоритму [7]. Вначале выполняется сглаживание изображения для удаления шума с помощью методов гомоморфной и медианной фильтрации, на локальных максимумах градиентов отмечаются границы с помощью методов пороговой фильтрации. Итоговые границы определяются путём подавления всех краёв, несвязанных с «сильными» границами.

На рисунке 3 приведено изображение микроstructures, полученное с помощью просвечивающей оптической микроскопии, до (слева) и после (справа) применения преобразования Хафа и детектора Канни. Видно, что в результате применения методов нелинейной фильтрации достигается автоматическое четкое выделение контуров объектов, а также распознавание связных областей.

В работе приведены результаты адаптации методов цифровой обработки изображений для оценки параметров структур, изображения которых формируются в результате физического эксперимента.

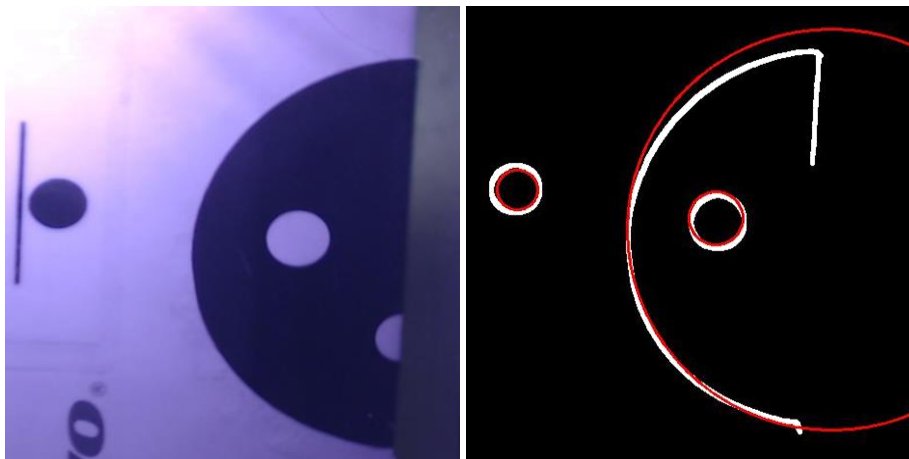


Рисунок 3 – Изображение микроструктуры, полученное с помощью просвечивающей оптической микроскопии, до (слева) и после (справа) применения преобразования Хафа и детектора Канни

1. Продемонстрирована возможность обработки компонентов освещенности и коэффициента отражения отдельно: изменять частотную составляющую коэффициента отражения без влияния на частотную составляющую освещенности из-за предварительного логарифмического преобразования при гомоморфной фильтрации. Это позволяет значительно подавлять шумы при одновременном выделении четких контуров структур на изображениях растровой электронной микроскопии.

2. Установлено, что при использовании адаптивного подбора апертуры медианного фильтра сохраняются резкие границы объектов, эффективно подавляются некоррелированные или слабо коррелированные помехи и малоразмерные детали, что перспективно для анализа данных просвечивающей оптической микроскопии.

3. Показано, что перспективными для целей определения размеров и формы объектов на изображениях физического эксперимента являются методы нелинейной гомоморфной и медианной фильтрации и нелинейных преобразований Хафа и Канни. В результате применения методов нелинейной фильтрации достигается автоматическое четкое выделение контуров объектов, а также распознавание связанных областей.

#### Список литературы

1. Шапиро, Л. Компьютерное зрение. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.
2. Желтов С.Ю. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. / С.Ю. Желтов [и др.]; ред. С.Ю. Желтов. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
3. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс [под ред/ П.А. Чочиа]. – М.: Техносфера, 2012 – 1104 с.
4. Solomon C.J. Fundamentals of digital image processing: a practical approach with examples in Matlab / C.J. Solomon, T.P. Breckon. – New York: Wiley-Blackwell, 2010. – 614 p.
5. Current state of the research on optoacoustic fiber-optic ultrasonic transducers based on thermoelastic effect and fiber-optic interferometric receivers / A.P. Mikitchuk, E.I. Girshova, V.V. Nikolaev // Computer Optics. – 2023. – in press.
6. Patidar P. Image De-noising by Various Filters for Different Noise. / P. Patidar, S. Srivastava // Int. J. of Comput. Appli. – Vol. 9, №4. – 2010. – P. 89–149.
7. Bradski G. Learning OpenCV / G. Bradski, A. Kaehler. – Boston : O'Reilly Media. – 2008. – 571 p.

УДК 621.384.2

Говорун К.В.<sup>1)</sup>, Ермакович О.Л.<sup>2)</sup>, Лисовский Г.А.<sup>2)</sup>, Смоловский С.С.<sup>1)</sup>, Титовицкий И.А.<sup>1)</sup>

## ВЫРАВНИВАНИЕ РАДИАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ В БЛОКЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАДИОИЗОТОПНОГО ПЛОТНОМЕРА

<sup>1</sup>ООО “АКВАР-СИСТЕМ”, Минск;

<sup>2</sup>НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, Минск

С помощью узкого пучка бета-излучения проведено сканирование в радиальном направлении сигнала цилиндрической ионизационной камеры. Полученные данные позволяют вычислить размеры и поверхностную плотность компенсирующих алюминиевых дисков и колец, располагаемых на поверхности входного окна камеры и выравнивающих ее сигнал в направлении от центра к периферии. В результате ожидается снижение погрешности контроля плотности листового материала при его вертикальном смещении в измерительном зазоре плотномера.

Одной из проблем при использовании радиоизотопного плотномера в составе сканирующей системы для непрерывного контроля массы квадратного метра движущегося бумажного полотна является минимизация систематической погрешности прибора при вертикальном смещении полотна в измерительном зазоре. Указанный сдвиг вызывает нежелательное изменение сигнала детектора, которое обрабатывающая программа ошибочно воспринимает как изменение массы (позиционная погрешность). Причина изменения сигнала: уширение первичного пучка  $\beta$ -частиц в результате их рассеяния в контролируемом материале и, как следствие, выход части потока в область детектора с уменьшенной чувствительностью.

Ранее нами было предложена конструкция специально коллиматора в виде пчелиных сот, устанавливаемого перед входным окном ионизационной камеры (ИК) и отсекающего рассеянные  $\beta$ -частицы в угол более  $31^\circ$ . Указанный коллиматор обеспечивал снижение позиционной погрешности в 3 раза через фиксацию размера пятна “засветки”  $\beta$ -потока на входном окне ИК при смещении материала в измерительном зазоре [1,2].

В настоящей работе предпринят альтернативный подход – выровнять чувствительность ИК в радиальном направлении, что повлечет за собой постоянство сигнала ИК при увеличении радиуса пятна засветки. В качестве датчика потока  $\beta$ -частиц использовался блок детектирования радиоизотопного плотномера ЛЕБ-1 с цилиндрической токовой ионизационной камерой LND 52024 и диаметром входного окна 70 мм. Источником  $\beta$ -излучения являлся блок излучателя плотномера с закрытым источником КАСВ 14466 заполненного радионуклидом  $Kr-85$  активностью 14,8 ГБк. В качестве листового материала использовались аттестованные меры поверхностной плотности (МПП) на основе лавсановых дисков по ГОСТ 8.171-75 [3]. Градуировка плотномера осуществлялась с помощью указанных мер, которые располагались в измерительном зазоре в штатной позиции.

Для исследования радиальной чувствительности ИК применялся специально изготовленный держатель источника  $Kr-85$  с узким коллимационным отверстием, обеспечивающим растр  $\beta$ -пучка порядка  $6^\circ$ . Держатель с источником передвигался с шагом 2 мм в плоскости параллельной входному окну ИК на удалении от него 9 мм. Текущий сигнал нормировался на сигнал, соответствующий центру входного окна.

На рисунке 2а приведены результаты сканирования чувствительности ИК в радиальном направлении. Экспериментальные точки аппроксимированы зависимостью (кривая 1):

$$\vartheta(\rho) = 0,0578 + \exp\left(\frac{2,1}{\rho-35}\right) \quad (1)$$

Выравнивание чувствительности может быть осуществлено за счет расположения на поверхности входного окна ИК компенсатора (рисунок 1) в виде центрального диска и набора концентрических колец, ослабляющая способность которых по отношению к  $\beta$ -излучению уменьшается в радиальном направлении через пилообразную функцию  $\vartheta_k(\rho)$ , показанную на рисунке 2 (кривая 2). Предлагаемый компенсатор может быть изготовлен из

алюминиевой фольги с разной приведенной массой ( $\text{г/м}^2$ ). Его внешний вид показан на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид компенсатора. Радиус центрального диска 5 мм; внутренние радиусы концентрических колец, мм: 5, 10, 15, 20; поверхностная плотность  $\text{г/м}^2$ , соответственно: 45, 41, 36, 29, 18.

Нормированный сигнал ИК без компенсатора и с ним определяется средним значением функций  $\vartheta(\rho)$  и  $\vartheta_k(\rho)$  при интегрировании в круге засветки радиуса R:

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \vartheta(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \quad (2)$$

$$\bar{\vartheta}_k = \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \vartheta_k(\rho) \cdot \rho \cdot d\rho \quad (3)$$

Результат интегрирования (2), (3) при изменении параметра R (предела интегрирования) представлены на рисунке 2б. Видна существенная стабилизация сигнала ИК (кривая 2) при увеличении радиуса засветки в случае наличия компенсатора.

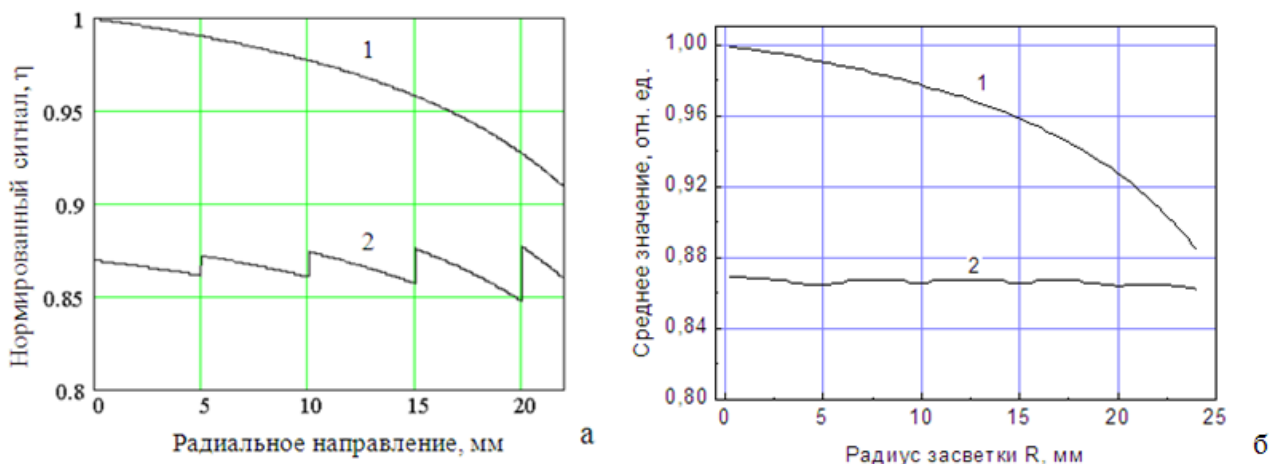


Рисунок 2 – Зависимость нормированного сигнала ИК при сканировании ее окна узким зондирующим пучком  $\beta$ -излучения (а) и зависимость нормированного сигнала ИК от радиуса засветки рабочим  $\beta$ -пучком. 1- без компенсатора, 2- с компенсатором.

Результаты расчета показывают, что представленный выше компенсатор на входном окне ионизационной камеры может на порядок уменьшить позиционную погрешность плотномеров, т.е. снизить ее до  $0,8 \text{ г/м}^2$ .

#### Список литературы

1. Ермакович О. Л., Лисовский Г. А., Кучинский П. В., Титовицкий И. А. Повышение точности измерений радиоизотопного плотномеров // Приборы и методы измерений. – 2015. – №1(10). – С70-75.
2. Ермакович О. Л., Лисовский Г. А., Титовицкий И. А. Рассеяние бета-излучения листовым материалом в измерительном зазоре радиоизотопного плотномеров // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: Тр. 5-й Междунар. научно-технич. конф./г. Могилев (24-25 сентября 2014 г.). – С172-173.
3. ГОСТ 8.171-75 Меры поверхностной плотности для радиоизотопных толщиномеров. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов. – 1975. – 36 с.

## РЕЖИМЫ НАНЕСЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННГО ИСТОЧНИКА

Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

Для плавной регулировки энергии наносимых на подложку ионов между лазерной мишенью и подложкой располагается сетка, на которую по отношению к лазерной мишени подается отрицательный потенциал. В результате после сетки формируется поток частиц, состоящий преимущественно из ионов энергией которых можно надежно и плавно управлять в большом динамическом диапазоне, подавая на сетку по отношению к подложке положительный потенциал. Показано, что физические процессы, происходящие в промежутке сетка-подложка при заземленной сетке не влияют на физические процессы в промежутке мишень-сетка. Найдены условия, когда лазерно-плазменный источник для нанесения нанопокровтий с использованием ионных потоков позволяет производить травление поверхности подложки за счет вторичной эмиссии, создавать за счет имплантации псевдодиффузный слой материала лазерной мишени в приповерхностном слое материала подложки и наносить материал лазерной мишени на поверхность подложки. Все это можно производить не разгерметизируя вакуумную камеру, что позволит получать высокоадгезионные нанопокровтия в стерильных условиях.

Основным преимуществом лазерно-плазменного метода нанесения нанопокровтий является: стерильность, возможность получить плазму из любого вещества. Кроме того, лазерно-плазменный метод обладает воспроизводимостью при осаждении нанопокровтий и позволяет контролировать их состав. Нанесение нанопокровтий с помощью лазерно-плазменного метода достаточно просто. При воздействии лазерного излучения на мишень формируется эрозионный плазменный факел. Если на некотором расстоянии от мишени поместить подложку, то на ней осаждается пленка. К сожалению, в этом случае затруднена плавная регулировка параметров плазмы эрозионного факела. Регулировать параметры эрозионного факела можно, изменяя плотность мощность лазерного излучения, которая в свою очередь регулируется изменением энергии в лазерном импульсе и изменением фокусировки. Динамический диапазон современных технологических лазеров не велик, а динамические устройства плавной регулировки фокусного расстояния сложны, дороги и ненадежны.

Для устранения этого недостатка в [1] было предложено разместить между мишенью и подложкой сетку. Подавая на сетку отрицательный потенциал по отношению к мишени можно после сетки получить поток заряженных, частиц состоящий преимущественно из ионов, а подавая на сетку плавно изменяющийся положительный потенциал по отношению к подложке, можно в большом динамическом диапазоне плавно изменять энергию ионов, падающих на подложку. Для того чтобы источники питания в цепи мишень-сетка и сетка-подложка были независимыми сетку необходимо заземлить.

Для воздействия на мишень использовался импульсный YAG: Nd<sup>3+</sup> лазер LS-2137 фирмы Lotis – ТП (Беларусь-Япония) с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса по полувывсоте  $\tau \sim 20$  нс. Частота следования лазерных импульсов  $1 \div 10$  Гц, энергия в отдельном импульсе  $0,1 \div 0,5$  Дж.

Электрическая схема эксперимента изображена на рисунке 1. Расстояние мишень-подложка составляло 12 см, сетка располагалась на середине этого промежутке. В качестве мишеней использовался технически чистый алюминий А7. Подложки изготовлены из кремния КДБ-03 размером 12,5x35 мм.  $R_{н1} = R_{н2} = 390$  Ом.

Рассмотрим процессы, происходящие в промежутке мишень-сетка при различных потенциалах и плотностях мощности воздействующего лазерного излучения. Как было показано в [2] при воздействии лазерного импульса с плотностью мощности  $5,6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на графитовую мишень достаточно подать отрицательный потенциал на сетку по отношению к

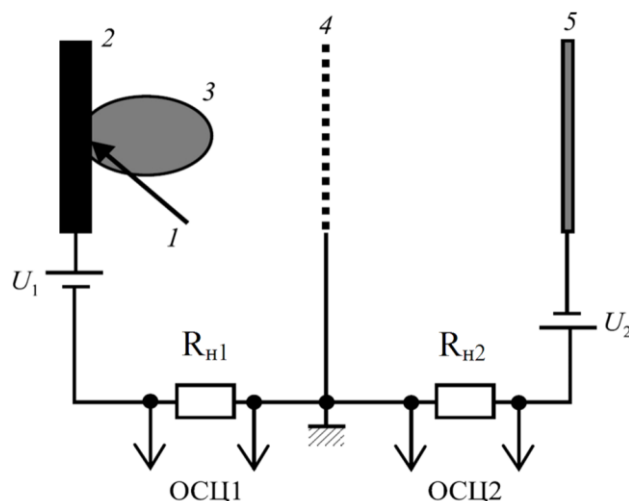


Рисунок 1 – Схема управления электронными и ионными составляющими эрозивной лазерной плазмы  
 1 – лазерное излучение; 2 – мишень; 3 – эрозивный плазменный факел; 4 – сетка;  
 5 – подложка, ОСЦ1 и ОСЦ2 – сигналы, снимаемые осциллографом с нагрузок  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$   
 $U_1$  – потенциал между сеткой и мишенью,  $U_2$  – потенциал между сеткой и подложкой

подложке 2,5 В, чтобы после сетки сформировался поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов. Однако, учитывая, что в экспериментах при различных плотностях мощности лазерного излучения формируется эрозивный лазерный факел с различным плазодинамическим давлением, температурой и ионизацией, необходимо увеличить этот потенциал до 10÷30 В.

На рисунке 2 представлены кривые тока в промежутке мишень-сетка (1) и тока в промежутке сетка-подложка (2) при потенциале в промежутке мишень-сетка 30В, а к промежутку сетка-подложка потенциал не приложен. Эти результаты получены при воздействии относительно малой плотности мощности лазерного излучения  $2,9 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на алюминиевую мишень. Как видно из рисунка кривая тока в промежутке мишень-сетка "двугорбая", первый "горб" формируется за счет обратного тока электронов, как наиболее легких частиц, на мишень за счет потенциала электрического поля в промежутке мишень-сетка. Второй "горб" формируется за счет ионов, движущихся к сетке. После сетки формируется поток заряженных частиц, состоящий из ионов. Поэтому кривая тока (2) "одногогорбая".

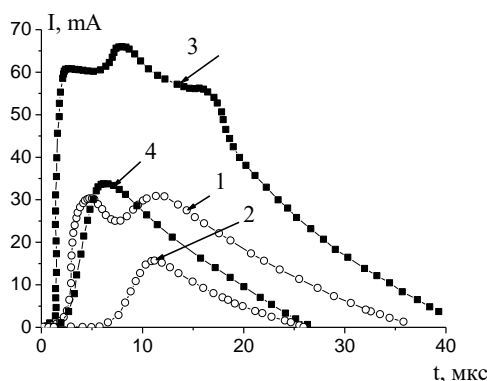


Рисунок 2 – Зависимость тока от времени для различных плотностей мощности  $q$  воздействующего лазерного излучения на алюминиевую мишень.  $q=2,9 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>: 1 – ток в промежутке мишень-сетка, 2 – ток в промежутке сетка-подложка.  $q=5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>: 3 – ток в промежутке мишень-сетка, 4 – ток в промежутке сетка-подложка

При увеличении плотности мощности воздействующего лазерного излучения плазменный факел формируется с большим плазодинамическим давлением, большей температурой, многократной ионизацией и большего заряда в двойном электрическом слое. За счет этого формирование потоков заряженных частиц в промежутке мишень-сетка усложняется. На рисунке 2 представлены кривые потоков заряженных частиц в промежутке мишень-сетка при



воздействии лазерного излучения плотностью мощности  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> на мишень из алюминия. Как видно из рисунка 2 кривая 3 имеет несколько "горбов".

При увеличении плотности мощности лазерного излучения концентрация ионов увеличивается, в том числе и за счет многократной ионизации. Таким образом, форму кривой 3 рисунка 2 можно объяснить следующим образом. При появлении плазмы в промежутке мишень-сетка электрическое поле заставляет ионы двигаться к отрицательному потенциалу сетки, а электроны к мишени. Однако, из-за экранирующего действия потенциала сетки ионами, электроны двигаются с небольшой скоростью к сетке за счет динамики продуктов разрушения или совсем с небольшой скоростью к поверхности мишени. В это время ток в цепи мишень-сетка определяется в основном током ионов (первый "горб" рисунок 2, кривая 3). Как только основной ток ионов долетел до сетки (~ 4 мкс после начала воздействия лазерного излучения) потенциал, поданный на нее с источника  $U_1$  уже не заэкранирован ионами и электроны начинают двигаться в сторону мишени, резко увеличивая обратный ток электронов (второй "горб"). Третий "горб" на кривой 3 определяется прямым ионным потоком и обратным потоком электронов в конце распадающегося плазменного факела с уменьшающимися параметрами. При этом форма кривой ионного тока в промежутке сетка-подложка представляет собой ассиметричный колокол (см. рисунок 2, кривая 4).

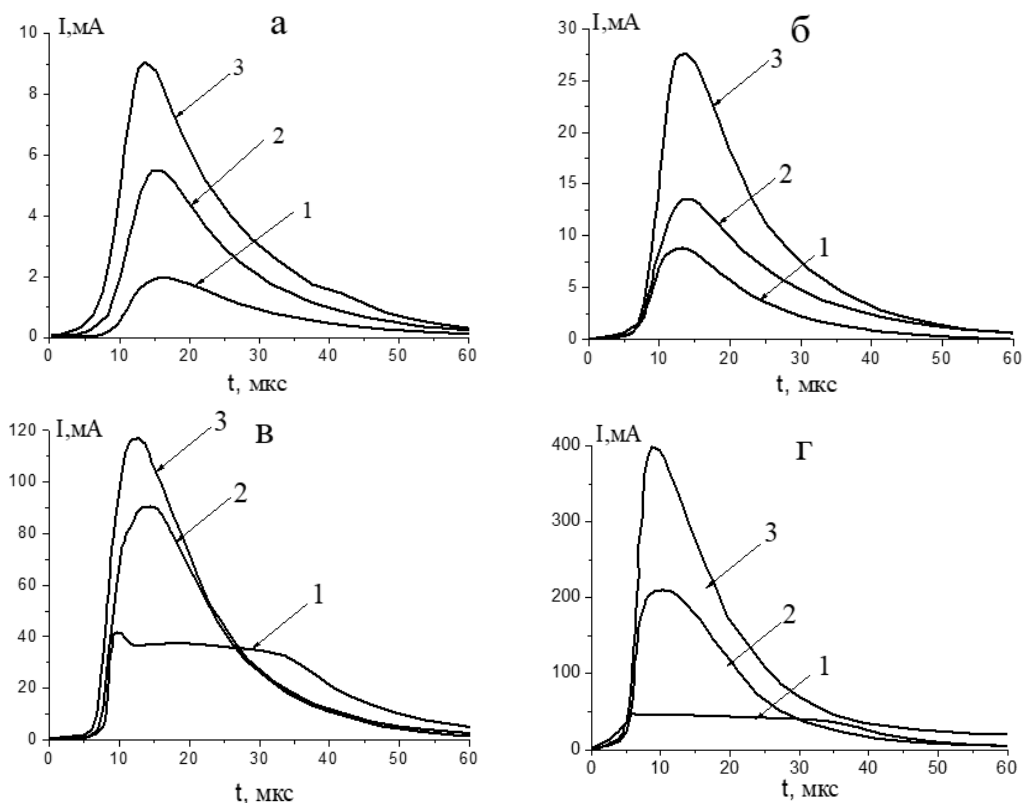


Рисунок 3 – Зависимость тока на подложке от времени при различных плотностях мощности лазерного излучения и различных ускоряющих потенциалах между сеткой и подложкой: а –  $2,5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; б -  $2,9 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; в -  $3,4 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; г -  $3,7 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; 1- 50 В, 2 – 200 В, 3 – 400 В.

Рассмотрим теперь процессы в промежутке сетка-подложка. Результаты таких экспериментов представлены на рисунке 3. При относительно малых плотностях мощности лазерного излучения ( $2,5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) ионные потоки, падающие на подложку, зависят от приложенного потенциала к промежутку сетка-подложка (см. рисунок 3А). При этом временная форма импульсов представляет ассиметричный колокол. При увеличении плотности мощности лазерного излучения до  $2,9 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> качественные результаты аналогичны предыдущему случаю, однако заметно значительное увеличение ионного потока на подложку (см. рисунок 3Б). Увеличение потенциала в промежутке сетка-подложка приводит к увеличению тока ионов на подложку. Рассмотрим подробно рисунок 3В. При плотности мощности лазер-

ного излучения  $3,4 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и потенциале в промежутке сетка-подложка 50 В наблюдается резкое ограничение ионного тока. Как было показано в [3] такое ограничение обусловлено вторичной эмиссией ионов с поверхности подложки. При увеличении потенциала в промежутке сетка-подложка кинетическая энергия первичных ионов у поверхности мишени достигает такой величины, что из-за уменьшения сечения столкновения в этом случае наблюдается имплантация материала мишени в приповерхностную область материала подложки. При этом кривая токов на подложку опять ассиметричный колокол. Ионный поток в этом случае значительно возрастает. При увеличении плотности мощности воздействующего лазерного излучения величина токов существенно увеличивается (рисунок 3Г).

Однако несмотря на такие сложные изменения ионных токов в промежутке сетка-подложка, в промежутке мишень-сетка общая кривая тока при используемых плотностях мощности представляет собой двугорбую кривую (см. рисунок 2, кривая 1) и таким образом процессы в промежутке сетка-подложка не влияют на процессы в промежутке мишень-сетка. Это происходит из-за того, что в используемой электрической схеме (см. рисунок 1) заземлена сетка. При большей плотности мощности лазерного излучения кривая общего тока в промежутке мишень-сетка будет "трехгорбой", но и в этом случае физические процессы в промежутке сетка-подложка не влияют на процессы в промежутке мишень-сетка.

Таким образом, эксперименты показали, что в лазерно-плазменном источнике для нанесения нанопокровов физические процессы, происходящие в промежутке, сетка-подложка, не влияют на физические процессы в промежутке мишень-сетка. Это обусловлено тем, что в электрической схеме источника заземлена сетка. Показано, что лазерно-плазменный источник для нанесения нанопокровов с использованием ионных потоков позволяет при определенных условиях производить травление поверхности подложки за счет вторичной эмиссии, создавать за счет имплантации псевдодиффузный слой материала лазерной мишени в приповерхностном слое материала подложки и наносить материал лазерной мишени на поверхность подложки. Все это можно производить не разгерметизируя вакуумную камеру, что позволит получать высокоадгезионные нанопокровы в стерильных условиях.

#### Список литературы

1. Устройство управления параметрами эрозионного лазерного факела в вакууме для осаждения наноструктурированных покрытий на различные материалы пат. 12575 Респ. Беларусь МПК С 23С 14/00 (2006.01), С 23С 28/00 (2006.01) /Гончаров В.К., Пузырев М.В. Ступакевич В.Ю., заявитель Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко" Белорусского государственного университета заявл. 16.01.2020; опубл. 30.04.2021 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2021. – № 2. – С. 72.

2. Гончаров В.К., Василевич А.Е., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю. Лазерно-плазменный источник ионов с регулируемой энергией для нанесения наноплёнок // Электроника инфо. – 2016. - №11. - С 54-57

3. Гончаров, В.К., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю. Физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия с управляемой энергией для нанесения нанопенок // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. - 2017. - № 3 – С.79-87.

УДК 537.871.3

Грабчиков С. С., Грабчикова Е. А., Зубарь Т. Е., Панасюк М. И, Канафьев О. Д.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ–ЖЕЛЕЗО

ГО "НПЦ НАН Беларуси по материаловедению", Минск, Республика Беларусь

В настоящей работе исследована эффективность экранирования магнитостатических полей покрытиями на основе сплавов  $Ni_{80}Fe_{20}$  с целью разработки высокоэффективной защиты приборов и аппаратуры широкого спектра назначения.

Над решением проблемы защиты изделий электронной и радиоэлектронной техники, биологических объектов, информации от воздействия различного типа внешних электромагнитных полей (ЭМП) работают ведущие специалисты многих стран мира [1-3]. Одним из наиболее сложных случаев защиты от воздействия внешних ЭМП является случай экранирования статических магнитных полей [10]. Это связано с тем, что в данном случае основную роль играет магнитная составляющая ЭМП, которая обладает гораздо более высокой проникающей способностью, чем электрическая составляющая [1,2]. Для экранирования магнитостатических полей обычно используют магнитомягкие материалы (электротехническая сталь, пермаллой, аморфные сплавы). Для достижения приемлемой эффективности требуется значительная масса этих материалов, при этом технологический процесс изготовления экранов заданной конфигурации очень сложен.

### Методика эксперимента

Покрытия на основе сплавов  $Ni_{80}Fe_{20}$  были сформированы методом электролитического осаждения на цилиндрических образцах из алюминия с внешним радиусом 22,5 мм и максимальной длиной 300 мм. Толщина сплавов  $Ni_{80}Fe_{20}$  ( $d$ ) составляла 50; 100; 130; 150; 200 и 400 мкм. Для исследования влияния длины цилиндра на эффективность экранирования от образца длиной 300 мм последовательно отрезали 40 мм и проводили измерения характеристик.

Оценка эффективности экранирования ( $\mathcal{E}$ ) проводилась по результатам измерений отношения напряженностей магнитного поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана  $H$  и при наличии его  $H_1$  [2].

Установка для исследования эффективности магнитостатического экранирования состояла из трех взаимно перпендикулярных катушек Гельмгольца, индуцирующих трехкомпонентное постоянное магнитное поле напряженностью от 0 до 5500 А/м. Расчет  $\mathcal{E}$  производился на основе измерений величины э.д.с. Холла без экрана ( $E$ ) и с экраном ( $E_1$ ), проведенных с помощью калиброванного элемента Холла чувствительностью 1 мВ/30 Э.

Для количественной оценки исследованных материалов использовали параметры, взятые из кривых зависимости  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ , – напряженность магнитного поля, соответствующего максимальной эффективности экранирования ( $H_{\max}$ ), максимальная эффективность экранирования ( $\mathcal{E}_{\max}$ ).

Измерения статических магнитных характеристик сплавов  $Ni_{80}Fe_{20}$  проведены баллистическим методом [4] на образцах кольцевой формы с внешним диаметром 45 мм и внутренним диаметром 25 мм. Толщина образцов составляла 20, 50, 100 и 200 мкм.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Кольцевые образцы сплавов  $Fe_{20}Ni_{80}$  характеризовались следующими значениями максимальной магнитной проницаемости  $\mu \approx (1,0 \div 1,37) \times 10^4$ , магнитной индукции насыщения  $B_s \approx 0,7$  Т, остаточной индукцией насыщения  $B_r = 0,47$  и коэрцитивной силы  $H_c = 25$  А/м. С ростом толщины покрытий от 20 до 200 мкм значения  $\mu$  уменьшается от  $1,37 \times 10^4$  до  $1,05 \times 10^4$ , значения  $H_{\max}$  смещаются от 50 до 40 А/м.

Обычно, при рассмотрении магнитоэкранирования, исходят из принципа шунтирования магнитного поля ферромагнитным материалом [1, 5]. Основная суть данного принципа заключается в замыкании силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку. Согласно данному подходу, эффективность экранирования константа и прямо пропорциональна значениям  $\mu$  материала экрана и обратно пропорциональна площади его поперечного сечения. Для бесконечного цилиндрического экрана расчет эффективности экранирования проводят по формуле [6]:

$$\mathcal{E}_{\text{цил.}} = 0,57\mu d/r \quad (1)$$

где  $d$  – толщина экрана [мм];  $r$  – внешний радиус [мм].

На рисунке 1 представлены зависимости  $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$  для экранов на основе сплавов  $Fe_{20}Ni_{80}$  с внешним радиусом 22,5 мм, длиной 300 мм и различными толщинами. Как следует из теории, с уменьшением радиуса и увеличением толщины экранов эффективность возрастает. Однако, как видно из рис. 1, зависимость эффективности от толщины имеет нелинейный характер. При изменении толщины экранов с внешним радиусом 22,5 мм в последовательности 50; 100; 200 и 400 мкм значения  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  увеличиваются 25; 32; 150 и 380, соответственно; а значения  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$  смещаются в сторону более высоких полей 10-12Э; 24-26Э; 50-54Э и 90-100Э, соответственно.

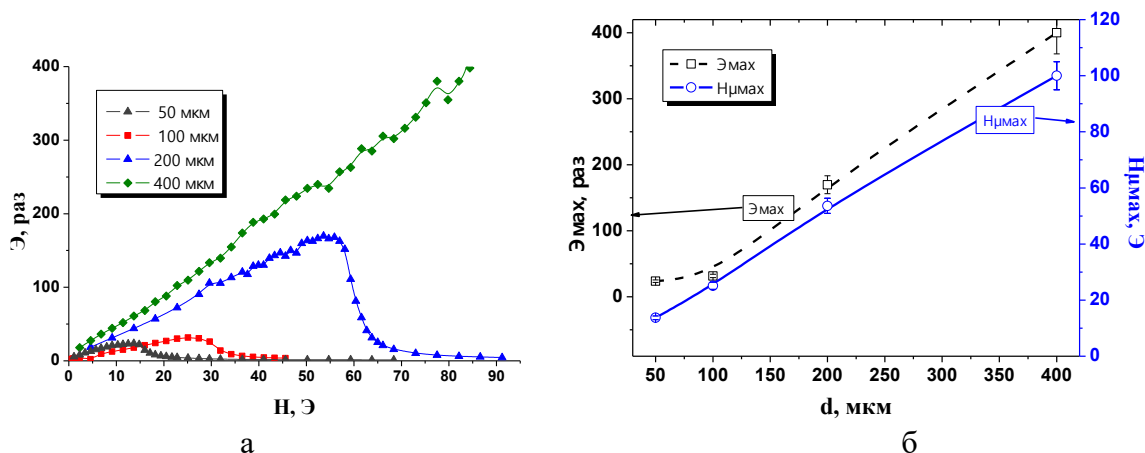


Рисунок 1 – Зависимости  $\mathcal{E}$  от напряженности магнитного поля (а) и  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  и  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$  от толщины (б) покрытий на основе сплавов  $Fe_{20}Ni_{80}$  с радиусом 22,5 мм.

Обобщенные результаты зависимостей  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  и  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$  от толщины для однослойных цилиндрических экранов на основе сплавов  $Fe_{20}Ni_{80}$  с внешним радиусом 22,5 мм представлены на рис. 2. Расширение областей магнитных полей с высокой экранирующей способностью с ростом толщины связано с увеличением сечения магнитных экранов и нелинейным характером изменения магнитной проницаемости с толщиной.

Как известно [5], в теоретических расчетах эффективности экранирования обычно используют идеальные геометрической формы образцов (бесконечная плоскость и бесконечный цилиндр, сфера). В реальных условиях ситуация намного сложнее – корпуса, блоки, которые необходимо экранировать, имеют конечные размеры, неправильную форму и могут содержать отверстия и апертуры. В связи с этим для практических целей важно знать, как размер экрана влияет на характеристики  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  и  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$ . На рисунке 2 приведены зависимости  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  и  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$  от длины цилиндрического экрана ( $l$ ) с радиусами 22,5 мм. Как видно, параметры  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  и  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$  становятся весьма стабильными при значениях  $l \geq 18-20$  см. При значениях  $l < 15$  см эффективность экранирования заметно снижается. Так, например, значения  $\mathcal{E}_{\text{max}}$  образца длиной 6 см в 2 раза ниже, чем для образца длиной 26-30 см. При этом  $H_{\mathcal{E}\text{max}}$  смещается в область более низких полей с 44 до 26 Э. Полученный результат связан с эффектом затекания магнитного поля в открытый образец конечного размера. Таким образом, для снижения влияния размерного эффекта цилиндрических и близких к ним по форме экранов необходимо, чтобы соотношение  $l/r \geq 8-9$ .

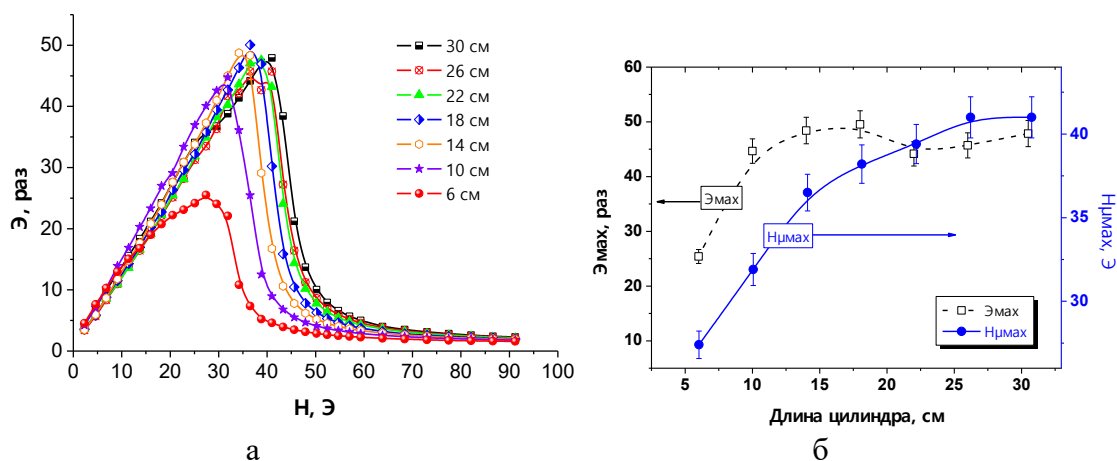


Рисунок 2 – Зависимости параметров  $\Delta$  (а) и  $\Delta_{max}$ ;  $H_{\Delta_{max}}$  (б) от длины цилиндрических экранов на основе сплавов  $Fe_{20}Ni_{80}$  с радиусом 22,5 мм

### Выводы

Теоретические оценки эффективности экранирования, полученные по формуле (1) для бесконечного цилиндра, не соответствуют экспериментальным данным, полученным для конечного цилиндрического образца:

- эффективность экранирования является сложной функцией ряда параметров – напряженности внешнего магнитного поля, магнитной проницаемости, линейных размеров экранов и др.;

- с ростом толщины покрытий сплавов  $Fe_{20}Ni_{80}$  наблюдаются эффекты увеличения  $\Delta_{max}$  и сдвиг в сторону больших магнитных полей  $H_{\Delta_{max}}$ , т.е. расширения диапазонов магнитных полей с высокой экранирующей способностью;

- снижения влияния размерного эффекта цилиндрических и близких к ним по форме экранов за счет затекания магнитного практически отсутствует при соотношении  $l/r \geq 8 \div 9$ .

Полученные результаты планируются использовать при изготовлении экранов для защиты чувствительных элементов различного типа приборов.

### Список литературы

1. Чернушенко, А. М. / Конструкции СВЧ устройств и экранов. А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. – 400с.
2. Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. Экранирование технических средств и экранирующие системы. Из-во: «Группа ИТД» М. – 2010. – 470с.
3. Electromagnetic interference shields for electronic devices: pat. USA / J.F. Gabower — № 7 358 447 15.04.2008.
4. Ю. В. Глонягин Элементы теории и расчета магнитостатических полей ферромагнитных тел. Л.: Судостроение, – 1967. – 180с.
5. Электрические и магнитные измерения. под ред. Е. Г. Шрамкова, 1937, из-во НКТП СССР, Ленинград. – С. 585.
6. М. Л. Волин. Паразитные процессы в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1981. – 296с.

УДК 621.396.67

Гринчук А. П.<sup>1</sup>, Кныш В. П.<sup>1</sup>, Бакаев А. Г.<sup>2</sup>, Шпарло Д. А.<sup>2</sup>, Крапчатов А. Н.<sup>2</sup>

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ ТРАДИЦИОННОЙ И ПЕРСПЕКТИВНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

<sup>1</sup>Научно исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета» Минск, Беларусь.

<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси» Минск, Беларусь.

Приведены результаты измерений эффективной поверхности рассеяния модели беспилотного летательного аппарата типа «алюминиевое крыло» и типа «стелс» фасеточной конструкции. Отмечены значительно лучшие характеристики на типовых направлениях БЛА «стелс»-типа. Намечены возможные пути дальнейшего уменьшения ЭПР БЛА.

Комплекс технических решений, в результате которых уменьшается уровень сигналов, возникающих в результате отражения летательным аппаратом электромагнитных волн, излучаемых радиолокатором, это «стелс»-технология, так это принято теперь называть. Радиолокационные станции – наиболее «дальнодействующее» средство обнаружения, и первый бум в прессе по поводу «стелс»-технологий был связан с появлением в 1975 году американского самолёта фирмы «Локхид» F-117, обшивка которого конструктивно выполнена из плоских панелей – фасет, как показано на рисунке 1. В действительности первые шаги были сделаны в Германии в конце Второй мировой войны. В результате ночных атак английских самолётов, оборудованных радиолокаторами, резко возросли потери немецких подводных лодок. Именно тогда на их рубки стали наносить радиопоглощающие покрытия и была разработана серийная технология производства мелкодисперсных ферромагнитных наполнителей, используемых в покрытиях. С этого момента проблема уменьшения радиолокационной заметности объектов вооружения и военной техники привлекает серьёзное внимание промышленно развитых стран [1].



Рисунок 1 – Самолет «Локхид» F-117

Основной характеристикой, определяющей свойства летательного аппарата как отражающего электромагнитные излучения объекта, является эффективная поверхность рассеяния (ЭПР). Она характеризует способность объекта преобразовывать падающую на объект электромагнитную волну в волну, распространяющуюся в направлении на приёмник. Соответственно, «стелс»-технология предполагает как разработку и исследование радиопоглощающих материалов и технологии их нанесения так и выбор геометрии объекта. Наносимые на различные элементы самолёта радиопоглощающие покрытия имеют переменную по профи-

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

лю толщину, сложную структуру с меняющимися значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей как по толщине (нормально к поверхности), так и вдоль поверхности обшивки. Кроме того, использовании радиопоглощающих материалов (РПМ) необходимо непрерывно находить компромисс между желанием получить минимальное отражение, толщиной материала, его прочностью и, наконец, аэродинамическими свойствами поверхности.

Конструкция летательного аппарата значительно упрощается за счёт «фасеточной» формы – то есть состоящей из отдельных плоских панелей. В этом случае радиолокационные волны от РЛС отражаются фасетами в различных направлениях. Если фасетные поверхности летательных аппаратов в виде клина развёрнуты к РЛС в двух плоскостях, то ЭПР такого самолёта становится минимальной.

С целью получения первичных данных об ЭПР были изготовлены из алюминиевой фольги: образец модели фюзеляжа обычного сечения крыла размером 800 мм как показано на рисунке 2 и образец модели фюзеляжа по «стелс» варианту как показано на рисунке 3.



Рисунок 2 – Испытание модели фюзеляжа в безэховой камере на радиотражение



Рисунок 3 – Испытание «стелс» модели фюзеляжа в безэховой камере

В лаборатории прикладной электродинамики НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ определена ЭПР данных образцов на векторном анализаторе MS4642B с измерительной антенной П6-23М, размещенные в безэховой камере. Измерение рассеянного сигнала проводилось в соответствии с "Инструкцией по эксплуатации MS4642B" для параметра S11.

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

Вычисление ЭПР объекта осуществлялась по калибровочному значению ЭПР диска  $\sigma_0$  диаметром 140мм [2].

$$\sigma = \sigma_0 \cdot 10^{\frac{\Delta}{10}}, \quad (1)$$

где  $\Delta = S_{об} - S_{эт}$

$S_{эт}$  – отраженный сигнал S11 от эталонного диска в дБ,

$S_{об}$  – отраженный сигнал S11 от объекта в дБ,

Испытания проводились для трех ракурсов положения макетов БЛА:

- 1) фронтальное,
- 2) передняя кромка крыла перпендикулярна направлению падения волны,
- 3) днище перпендикулярно направлению падения волн.

Результаты рассчитанных ЭПР для различных ракурсов приведены в таблицах 1-2.

Таблица 1

Ракурс	8 ГГц	10 ГГц	12 ГГц
1	0,08	0,10	0,15
2	0,08	0,15	0,35
3	10	10	12

Таблица 2

Ракурс	8 ГГц	10 ГГц	12 ГГц
1	0,015	0,018	0,015
2	0,003	0,008	0,012
3	18	22	20

Следует отметить, что ЭПР БЛА в ракурсе 3 имеет большое значение в очень узком секторе углов. В остальном, как видно, наблюдается явное преимущество характеристик макета БЛА Стелс. Кроме того, для маломерных и низкоскоростных БЛА с применением РПМ и материалов с малой диэлектрической проницаемостью и плотностью возможно значительное уменьшение их ЭПР и улучшение их аэродинамических характеристик.

#### Список литературы

1. Лагарьков А. Н. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс – технологий. / А. Н. Лагарьков, М. А. Погосян. // ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2003г.- т. 73, №9, С.779-787.

2. Н. Н. Алешкевич. Особенности измерения полей рассеяния крупногабаритных объектов/ Алешкевич Н. Н. Гринчук А. П. Громыко А. В. Кныш В. П// Материалы 15 -й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2022», Минск, 16 – 18 ноября 2022, С. 138 -139.



### ЗАДАЧА СИНТЕЗА ОБЛУЧАТЕЛЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН В ПРОСТРАНСТВЕ ВЕКТОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

В работе рассматривается решение обратной задачи синтеза поля облучателя по заданному распределению поля в раскрыве зеркальной антенны.

Решение уравнений Максвелла в сферической системе координат методом разделения переменных приводит к системе векторных функций, обладающих необходимой полнотой и ортогональностью для описания электромагнитного поля. Каждая элементарная волна может быть интерпретирована с физической точки зрения как источник электрических или магнитных диполей. Тангенциальные составляющие напряжённости электрического поля  $E_\tau(\theta, \varphi, r)$  на сферической поверхности некоторого радиуса  $r$  представляются суммой электрических и магнитных волн:  $M_{mn}, N_{mn}$ .

$$\vec{E}_\tau(\theta, \varphi, r) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=-n}^{+n} A_{mn} \cdot \vec{M}_{mn} + B_{mn} \cdot \vec{N}_{mn} \quad (1)$$

Коэффициенты  $A_{mn}, B_{mn}$  находится из решения задачи на собственные значения по известным величинам тангенциальных составляющих поля  $E_\theta, E_\varphi$  на сферической поверхности радиуса  $r_0$ , охватывающей излучающую систему.

$$A_{mn} = \frac{2n+1}{j4\pi Z_n(r_0)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \frac{1}{n(n+1)} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[ E_{\theta_0} m P_n^m - j E_{\varphi_0} \sin \theta \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \right] \cdot e^{-jm\varphi} d\theta d\varphi \quad (2)$$

$$B_{mn} = \frac{2n+1}{4\pi \left[ \frac{1}{kr} \frac{\partial(rZ_n(kr))}{\partial r} \right]_{r=r_0}} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \frac{1}{n(n+1)} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left[ E_{\theta_0} \sin \theta \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} - j E_{\varphi_0} m P_n^m \right] \cdot e^{-jm\varphi} d\theta d\varphi, \quad (3)$$

где  $P_n^m(\theta)$  – полиномы Лежандра,  $Z_n(kr)$  – сферические функции Ханкеля,  $k=2\pi/\lambda$  – волновой вектор.

Комплексные величины  $E_\theta, E_\varphi$  тангенциальных составляющих электрического вектора на поверхности сферы радиуса  $r_0$  берутся из измеренных данных или из массива величин, заданных аналитически. Найденные комплексные коэффициенты разложения  $A_{mn}, B_{mn}$  позволяют определить электромагнитное поле в любой точке пространства вне поверхности сферы, охватывающей излучающую систему в дальней, промежуточной и ближней зонах. Приведённые соотношения легли в основу программного обеспечения для вычисления полей на разных расстояниях от излучающей системы. Использование алгоритмов быстрого преобразования Фурье для проведения интегрирования по угловым координатам  $\theta, \varphi$  многократно ускоряет процесс получения результатов [1,2]. Таким образом можно перейти к решению обратной задачи, то есть по заданным значениям поля на некоторой внешней поверхности и рассчитанным коэффициентам найти искомое поле на сферической поверхности, охватывающей излучатель. Рассмотрим решение некоторой теоретической задачи: найти поле облучателя для зеркальной антенны с некоторыми заданными параметрами.

Допустим, что необходимо синтезировать поле облучателя для короткофокусных антенн с отношением диаметр/фокус равным, приблизительно, двойке. Для таких антенн применение рупорных облучателей или открытого конца волновода в качестве облучателя при-

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

водит к неполному облучению зеркала, а применение дипольных антенн в качестве облучателя даёт большую величину переливного излучения. За основу для расчётов примем следующие исходные параметры: облучение зеркала равномерное, фокусное расстояние  $10 \lambda$ , зеркало занимает телесный угол раскрытием  $120^\circ$ , облучатель расположен соосно с зеркалом. Геометрия расположения представлена на рисунке 1. Центром сферической системы координат является фокус зеркала, все расчётные соотношения будут получены относительно этого начала сферической системы координат.

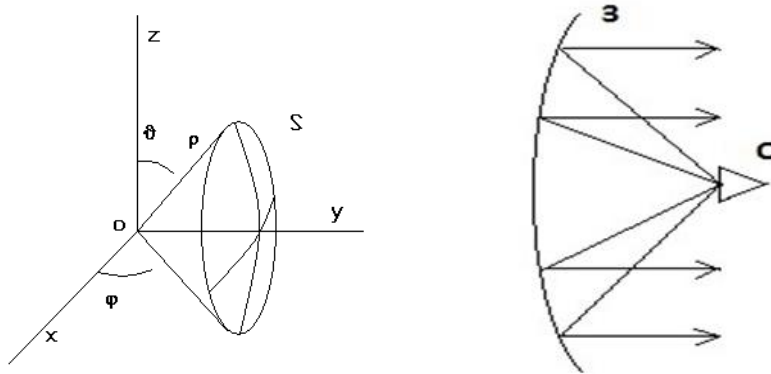


Рисунок 1 – Геометрия задачи. Формирование распределения поля облучателем.

Зеркало облучается полем одной поляризации. Оценка необходимого количества гармоник для представления поля  $N = kR_0$  ( $R_0 = 10 \lambda$ ) приводит к величине количества гармоник порядка 60. По этим исходным данным были проведены расчеты коэффициентов  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  (амплитуд сферических гармоник), необходимых для представления поля на сферической поверхности, сопряженной с зеркалом, (в пределах телесного угла).

Распределения амплитуд гармоник  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  приведены на рисунке 2.

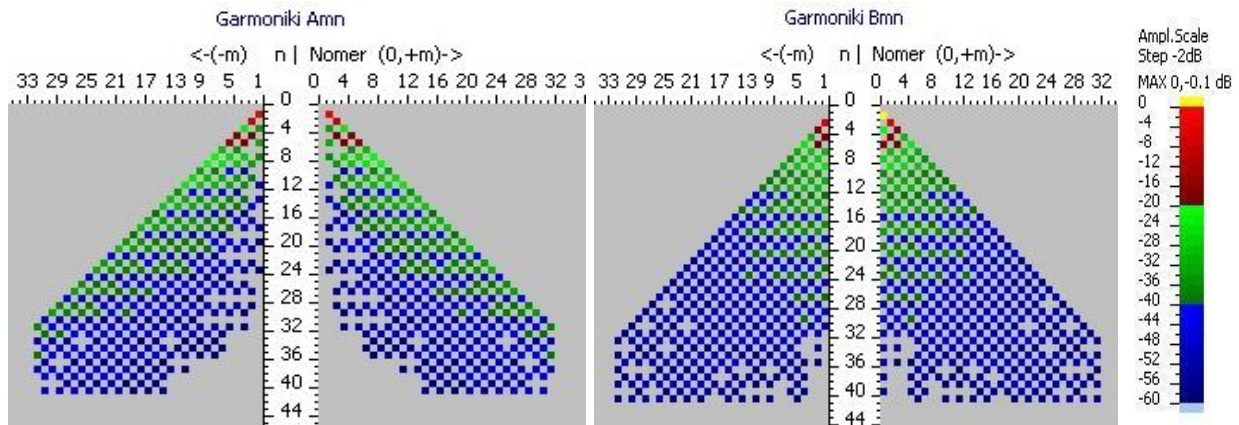


Рисунок 2 – Распределение амплитуд коэффициентов  $A_{mn}$ (слева),  $B_{mn}$ (справа) для равномерного облучения зеркала. Номер  $N$  – радиальный индекс изменяется от 1 до 40, индекс  $m$  изменяется от  $-n$  до  $+n$ .

Полученный набор коэффициентов  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$  позволяет оценить точность представления поля для различных  $N$ . На рисунке 3 приведены центральные строки распределений амплитуд полей на поверхности сферы радиуса  $R_0 = 10 \lambda$  для различного количества сферических гармоник, участвующих в представлении поля. Вне всяких сомнений,  $N=40$  даёт более близкую аппроксимацию поля в пределах заданного ( $150^\circ - 30^\circ = 120^\circ$ ) телесного угла. Доля «переливного» излучения находится на уровне  $-20\text{dB}$  и ниже.

В рассматриваемой задаче синтеза поля облучателя основной интерес представляет поле в непосредственной близости от фокуса. Смоделируем сначала поле на поверхности сферы радиуса  $R_0 = 10 \lambda$  на основе коэффициентов  $A_{mn}$ ,  $B_{mn}$ , но для гармоник с максимальным номером  $N=8$ . На рисунке 4 представлены результаты такого моделирования.

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

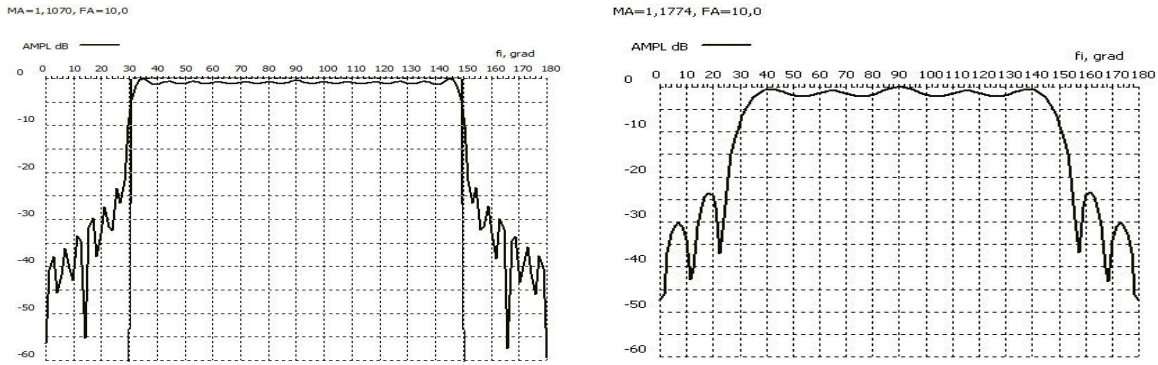


Рисунок 3 – Центральные сечения распределений амплитуд полей для  $N=40$  (слева) и для  $N=15$  (справа) на поверхности сферы радиуса  $R_0=10 \lambda$ .

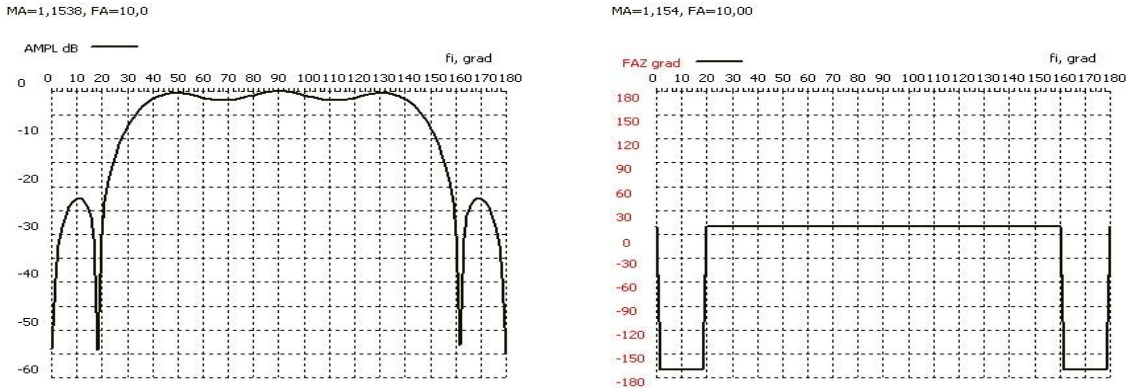


Рисунок 4 – Вид центральных сечений распределений амплитуды (слева) и фазы (справа) поля на поверхности сферы радиуса  $10 \lambda$ ,  $N=8$ .

В представлении поля участвуют гармоники с максимальным номером  $N=8$ . Анализ фазового распределения показывает, что теоретически можно получить фазовое распределение (равномерное) в пределах заданного телесного угла. Амплитудное распределение имеет пульсации в пределах до  $-2\text{dB}$  в телесном угле  $40^\circ$ - $140^\circ$  градусов, спад амплитуды поля от края сопряженной сферы с крутизной  $10\text{dB}/10^\circ$ .

Рассмотрим картины полей, получающиеся при расчетах, на малых расстояниях от начала координат (фокуса зеркала). Представляет интерес, естественно, картина поля на поверхности сферы радиуса  $1 \lambda$  с тем же набором гармоник. На рисунке 5 приведены центральные строки распределений амплитуд и фаз полей на поверхности сферы радиуса  $1 \lambda$  для  $N=8$ . Отметим «гладкий» характер распределений амплитуды и фазы. На рисунке 6 приведены центральные строки распределений амплитуд и фаз полей на сфере радиуса  $0.8 \lambda$ .

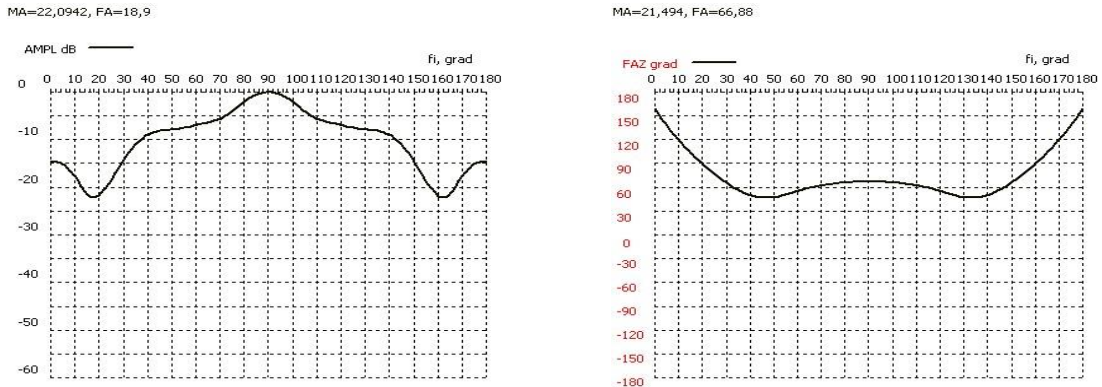


Рисунок 5 – 8 гармоник в представлении поля на поверхности сферы радиуса  $1 \lambda$ .

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

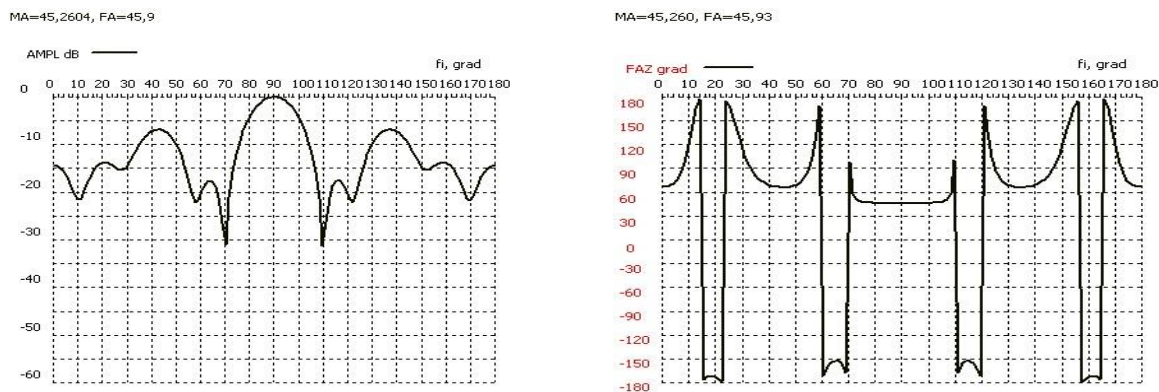


Рисунок 6 – 8 гармоник в представлении поля на поверхности сферы радиуса  $0,8 \lambda$ .

Проявляется реактивный характер представления поля. Амплитуда и фаза поля имеют изрезанный характер. Аналитически такой эффект обусловлен поведением функций Ханкеля: модуль функции резко возрастает при  $N < kR$ . Возрастание амплитуды поля говорит о том, что в этом месте должен находиться источник поля со своими амплитудой и фазой.

Подобный подход к решению обратной задачи, то есть по заданным значениям поля на некоторой внешней сферической поверхности и рассчитанным коэффициентам разложения  $A_{mn}, B_{mn}$  найти искомое поле на сферической поверхности, охватывающей излучатель, позволяет синтезировать оптимальный облучатель в рамках поставленной задачи. Для практической проверки теории в X-диапазоне длин волн были изготовлены несколько видов облучателей, реализующих дипольный подход. Амплитудно-фазовые характеристики облучателей измерялись на поверхности сферы радиусом  $15 \lambda$ , пересчитывались на поверхности сфер малого радиуса. Проведенная коррекция облучателей позволила получить прогнозные характеристики облучения поверхности зеркала.

#### Список литературы

1. Будаев А. Г. Алгоритм восстановления характеристик антенных систем по измерениям на сферической поверхности / А. Г. Будаев, А. П. Гринчук, А. В. Громыко // Материалы 9-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2016», Минск, 23 - 25 ноября 2016, С.154 -155.
2. Будаев А. Г. Восстановление пространственных характеристик слабонаправленных антенн по результатам измерения поля на сферической поверхности./ А. Г. Будаев, А. П. Гринчук, А. В. Громыко // Материалы 5-ой Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», Минск, 2019, С. 171-174.
3. Вуд. П. Анализ и проектирование зеркальных антенн / П. Вуд. – М. – 1984. – 208 с.

## ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Для углеродной нанотрубки произвольной геометрии в диэлектрической оболочке получено интегральное уравнение для амплитудно-фазового распределения тока при ее возбуждении электромагнитным полем. Вывод уравнения базируется на представлении нанотрубки в виде тонкого проводника с известным поверхностным сопротивлением. Влияние диэлектрической оболочки учитывается путем введения эквивалентных поляризационных токов и зарядов.

Электромагнитные волны микроволнового диапазона широко используются в различных областях. Это системы мобильной связи, радиолокационные системы, аппаратура медицинского назначения. Следовательно, все более актуальной становится проблема электромагнитного экранирования для решения задач электромагнитной совместимости, защиты людей и аппаратуры от излучения, обеспечения радиолокационного покрытия для военной техники. Это приводит к постоянному поиску новых типов радиопоглощающих материалов (РПМ) для обеспечения более тонкого покрытия, с меньшей плотностью, с более сильным поглощением в широкой полосе частот. В последние годы весьма привлекательны углеродные нанотрубки (УНТ) для создания РПМ. Применение углеродных нанотрубок позволяет при относительно тонких слоях композита и малых объемных долях нанотрубок и, следовательно, малом весе, в широкой полосе частот обеспечить значительный коэффициент поглощения электромагнитного излучения.

Вместе с тем, в ряде работ [1-4] отмечается, что при высоких температурах имеет место окисление УНТ. Это приводит к изменению их электрофизических характеристик. Для улучшения стойкости УНТ к коррозии и окислению разработан ряд методов нанесения на УНТ антиокислительного диэлектрического покрытия [3-5]. В этом случае при изучении электродинамических свойств УНТ ее можно трактовать как тонкий проводник с конечной проводимостью [6-7] заключенный в диэлектрическую оболочку.

$$\sigma_{cn} = -j \frac{2e^2 V_F}{\pi^2 \hbar a (\omega - j\nu)}, \quad (1)$$

В соотношении (1)  $e$  - заряд электрона,  $V_F$  - скорость Ферми,  $\hbar$  - постоянная Планка,  $a$  - радиус УНТ,  $\nu$  - частота соударений,  $\omega$  - частота электромагнитного поля,  $\nu$  - релаксационная частота.

Несмотря на наличие значительного количества программных комплексов электродинамического анализа, таких как Microwave Office, HFSS, CST Microwave Studio, для оценки взаимодействия отдельной УНТ с электромагнитной волной широко применяется метод интегральных уравнений (ИУ) в приближении тонкого проводника с использованием специализированных программных средств [8-9].

В работе предлагается обобщить метод ИУ на случай УНТ с диэлектрическим покрытием, учитывая влияние диэлектрика путем введения дополнительных эквивалентных токов поляризации. В этом случае рассматриваемая задача аналогична задаче возбуждения плоской электромагнитной волной тонкого проводника с плавно меняющейся произвольной геометрией покрытого тонким слоем диэлектрика [10]. Радиус УНТ-  $a$ , толщина слоя диэлектрика  $b-a$ .

При возбуждении тока в УНТ, в любой точке пространства  $\vec{r}$  существует электромагнитное поле с вектором напряженности  $\vec{E} = \vec{E}_1(\vec{r}) + \vec{E}_2(\vec{r})$ , где  $\vec{E}_1$  - поле,

определяемое поверхностными токами проводимости УНТ,  $\vec{E}_2$  - поле, обусловленное поляризационными токами и зарядами диэлектрического покрытия.

Поскольку радиус УНТ мал по сравнению с длиной волны  $\lambda$ , азимутальной составляющей плотности тока можно пренебречь по сравнению с продольной:  $\vec{J}(\vec{r}') = \vec{J}(\vec{s}') = J(s')\vec{s}'$ ,  $\vec{s}'$  – единичный вектор касательной к УНТ в данной точке. Считаем, что плотность тока  $J(s')$  распределена равномерно по поверхности УНТ:

$$J(s')\vec{s}' = \frac{I(s')}{2\pi a}\vec{s}', \quad (2)$$

где  $I(s')$  – ток текущий вдоль оси УНТ.

Поле  $\vec{E}_1$  определяется исходя из известных выражений для векторного и скалярного потенциалов. Можно показать, что касательная составляющая напряженности поля  $\vec{E}_1$  примет вид

$$E_{1\tau} = \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \int_S I(s') \left[ k^2 \vec{s}\vec{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right] G_a ds', \quad (3)$$

где  $S$  – длина УНТ,  $s, s'$  – криволинейные координаты точек наблюдения и источника.

Поле  $\vec{E}_2$  определяется на основе выражений для векторного и скалярного потенциалов, обусловленных поляризационными токами и зарядами и уравнения непрерывности, связывающего поляризационные токи и заряды. В рамках квазистатического приближения делается предположение, что напряженность электрического поля вблизи поверхности УНТ меняется как  $1/\rho$  при  $a \leq \rho \leq b$ , где  $\rho$  – координата в цилиндрической системе координат, т.е.  $E(\rho) = aE(a)/\rho$ . Это позволяет получить выражение для касательной составляющей напряженности поля  $\vec{E}_2$  в виде:

$$E_{2\tau} = \frac{\epsilon_a - \epsilon_0}{i\omega\epsilon_0\epsilon_a} \int_S I(s') \left( \frac{\partial^2 G_a(s, s')}{\partial s \partial s'} - \frac{\partial^2 G_b(s, s')}{\partial s \partial s'} \right) ds'. \quad (4)$$

Выражения (3-4) для полей получены с использованием приближения для функции Грина:

$$\int_0^{2\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} a d\varphi \approx 2\pi a \frac{e^{-ikr_a}}{r_a}, \quad \int_0^{2\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} b d\varphi \approx 2\pi b \frac{e^{-ikr_b}}{r_b},$$

$$G_a = e^{-ikr_a} / 4\pi r_a, \quad G_b = e^{-ikr_b} / 4\pi r_b,$$

$$r_a = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 + a^2}, \quad r_b = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 + b^2}.$$

Вывод интегрального уравнения для тока основан на предположении, что на поверхности УНТ выполняется импедансное граничное условие:

$$\vec{n} \times \vec{E}(\mathbf{r}) = Z[\vec{n} \times (\vec{n} \times \vec{H}(\mathbf{r}))], \quad (5)$$

где  $Z = 1/2\pi a \sigma_{cn}$  – погонное сопротивление, определяемое проводимостью УНТ;  $\vec{E}(\mathbf{r})$  и  $\vec{H}(\mathbf{r})$  – векторы напряженности электрического и магнитного полей в точке  $\mathbf{r}$  на поверхности УНТ;  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности УНТ в той же точке.

Для касательной, составляющей электрического поля на поверхности УНТ граничное условие (5) примет вид:

$$\vec{s} \cdot \vec{E}^{полное} = \vec{s} \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_i - Z\vec{I}) = 0 \text{ на } S, \quad (6)$$

где  $\vec{E}_i$  – амплитуда напряженности электрического поля источника возбуждения (падающей электромагнитной волны).

Используя условие (6) нетрудно получить интегральное уравнение для тока УНТ покрытой слоем диэлектрика:

$$-j \frac{k}{Z_0} \cdot I(s) \cdot Z(s) + \int_s I(s') \cdot \left[ k^2 G_a(s, s') \cdot \vec{s}' \cdot \vec{s} - \frac{\partial^2 G_a(s, s')}{\partial s \partial s'} - \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \frac{\partial^2 G_b}{\partial s \partial s'} \right] ds' = -j \frac{k}{Z_0} \cdot E_i(s). \quad (7)$$

Полученное интегральное уравнение позволяет учесть влияние диэлектрической оболочки на характер амплитудно-фазового распределения тока углеродных нанотрубок. В свою очередь знание характеристик одиночного включения дает возможность по известным методикам проводить расчет эффективных материальных параметров композитов на основе УНТ.

#### Список литературы

1. Yujin Li. Synthesis, structure and antioxidant performance of boron nitride (hexagonal) layers coating on carbon nanotubes / Yujin Li, Mo Yang, Binbin Xu, Qilei Sun // *Applied Surface Scienc.* – 2018. – Vol.450. – P. 284-291.
2. Wei-li Song. High-temperature microwave absorption and evolutionary behavior of multi-walled carbon nanotube nanocomposite / Wei-li Song, Mao-sheng Cao, Zhi-ling Hou, Jie Yuan, – 2009. – Issue 2. – P. 201-204.
3. Ming Luo. Oxidation resistance of multi-walled carbon nanotubes coated with polycarbosilane-derived SiC<sub>x</sub>O<sub>y</sub> ceramic / Ming Luo, Yawei Li, Shengli Jin, Shaobai Sang, Lei Zhao // *Ceramics International.* – 2011. – Vol. 37. - Issue 8. –P. 3055-3062.
4. Yuliya Lisunova. Ultrahigh Currents in Dielectric-Coated Carbon Nanotube Probes / Yuliya Lisunova, Ivan Levkivskiy, Patrycja Paruch // *Nano Lett.* – 2013.- Vol. 13.-P. 4527–4531.
5. Aidar Kemelbay. Conformal High-K Dielectric Coating of Suspended Single-Walled Carbon Nanotubes by Atomic Layer Deposition / Alexander Tikhonov, Shaul Aloni, Tevye R. Kuykendall // *Nanomaterials.* -2019. -9.-P. 185-196.
6. Hanson, G.W. Fundamental Transmitting Properties of Carbon Nanotube Antennas / G.W. Hanson // *IEEE Transactions on antennas and propagation.* – 2005.– Vol.53.– №.11.–P. 3426–3435.
7. Slepian, G. Ya. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas / G. Ya. Slepian, M. V. Shuba, S. A. Maksimenko, A. Lakhtakia // *Phys. Rev.* – В 73. – 2006. – 195416.
8. Лучанинов, А. И. Использование уравнения Поклингтона для анализа антенн из углеродных нанотрубок / А. И. Лучанинов, Е. А. Медведев, Уайд С. Р. // *Радиотехника.* – 2013. – Вып.174. – С. 112-121.
9. Демидчик, В. И., Корнев Р. В. Численно-аналитический метод расчета коэффициентов поляризуемости углеродных нанотрубок / В. И. Демидчик, Р. В. Корнев // *Сборник статей Шестой Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокачастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами».* Саратов, –2019. –С. 46-49.
10. Демидчик, В. И. Интегральное уравнение для тонких проводников с диэлектрическим покрытием / В. И. Демидчик // *Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1.* –2000. – №3. – С. 29-31.

Ермакович О. Л.

## **ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА, ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕРЕНИЯ РАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Проводится оценка точности измерения поверхностной плотности бумажного полотна посредством измерения рассеянного рентгеновского излучения. Рассматриваются факторы, влияющие на точность измерений.

В процессе производства бумаги и картона проводится непрерывный контроль качества изготавливаемой продукции. Одним из наиболее важных контролируемых параметров бумажного и картонного полотна является значение величины массы на единицу площади – поверхностная плотность. Для контроля данного параметра обычно применяются радиоизотопные приборы принцип работы, которых основан на измерении ослабления  $\beta$ -излучения [1,2]. Существует возможность измерения поверхностной плотности по рассеянному рентгеновскому излучению [3]. Измерение массы на единицу площади с помощью рассеянного рентгеновского излучения основано на том факте, что рассеяние рентгеновского излучения происходит на электронах вещества, а количество электронов в первом приближении пропорционально массе для всех элементов с отличием в два раза только у водорода.

Целью настоящей работы является следующее:

- проведение оценки физических факторов, влияющих на точность измерения поверхностной плотности бумажного полотна посредством измерения рассеянного рентгеновского излучения.
- на основании проведенных измерений поверхностной плотности выделить наиболее важные физические факторы, влияющие на точность измерений.

Элементный состав бумажного полотна.

Основная составляющая бумажного полотна – целлюлоза. Формула целлюлозы  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Кроме целлюлозы вторым по массе компонент – минеральное вещество белого цвета мел, каолин, окись титана. Наиболее часто мел -  $CaCO_3$ , каолин -  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Содержание минерального вещества может достигать 30 %.

Влияние содержания водорода.

Водород отличается от всех остальных элементов отсутствием нейтронов в ядре. Изотопы водорода: дейтерий, тритий, в ядрах которых есть нейтроны встречаются редко в природной среде. На единицу массы количество электронов у водорода приблизительно в два раза больше, чем у других элементов. В следствии, взаимодействие с ионизирующим излучением сильно отличаются от всех остальных элементов.

Влияние фотоэффекта.

Фотоэффект, вызванный рентгеновскими фотонами, с последующей потерей энергии электроном, вызывает уменьшение интенсивности рентгеновского излучения. Ослабление интенсивности происходит по экспоненциальному закону. При этом коэффициент ослабления зависит от энергии фотонов и от элементного состава вещества. На рисунке 1 приведены графики зависимости коэффициентов поглощения для пучка фотонов рентгеновского излучения, обусловленного фотоэффектом. График построен на основании данных размещенных в [4].

Приведены графики для элементов, содержащихся в бумаге. Углерод в целлюлозе, Al в каолине, Са в меле.



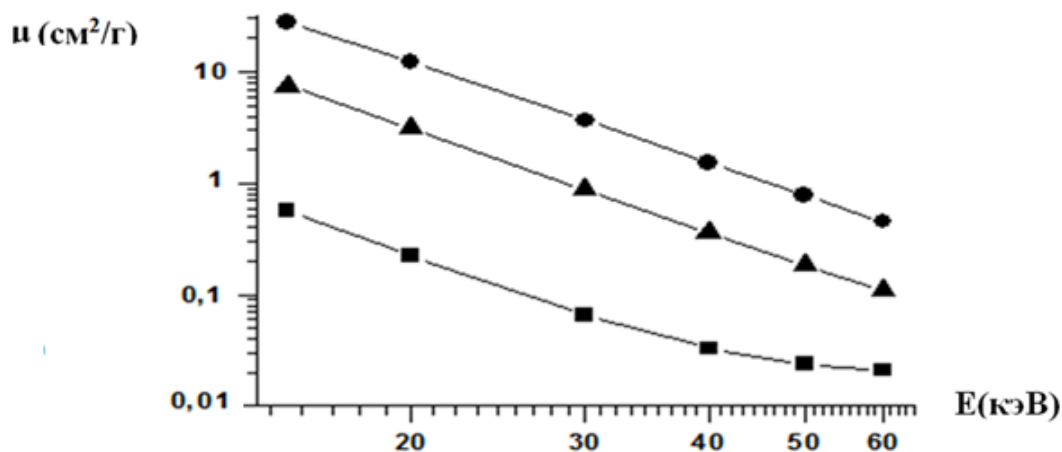


Рисунок 1 – Зависимость от энергии рентгеновского излучения коэффициентов поглощения  $\mu$  (см<sup>2</sup>/г),  
 -●- Ca, -▲- Al, -■-С.

Когерентное рассеяние.

При энергиях рентгеновских фотонов  $E_\gamma < E_{св}$ , где  $E_{св}$  – энергия связи электрона с ядром, происходит интерференция излучения рассеянного на разных электронах атома. Сечение рассеяния становится больше, чем рассеяние на одиночных электронах и зависит от угла рассеяния по-разному для различных элементов. Вводится функция атомного рассеяния  $f$  как отношение амплитуды волны, рассеянной одним атомом к амплитуде волны, рассеянной одним электроном. Функция атомного рассеяния аппроксимируется формулой:

$$f\left(\frac{\sin \theta}{\lambda}\right) = \sum_{i=1}^4 a_i \exp\left(-b_i \left(\frac{\sin \theta}{\lambda}\right)^2\right) + c, \quad (1)$$

где  $2\theta$  – угол между падающим пучком и направлением на детектор,  $\lambda$  – длина волны в ангстремах,  $a_i, b_i, c$  – табличные данные.

Влияние когерентного рассеяния приводит к увеличению коэффициента рассеяния по сравнению с рассеянием на каждом электроном атома индивидуально.

Результаты измерений.

Результаты измерения образцов из бумаги с различным содержанием мела и различных по величине поверхностной плотности представлены на рисунке 2.

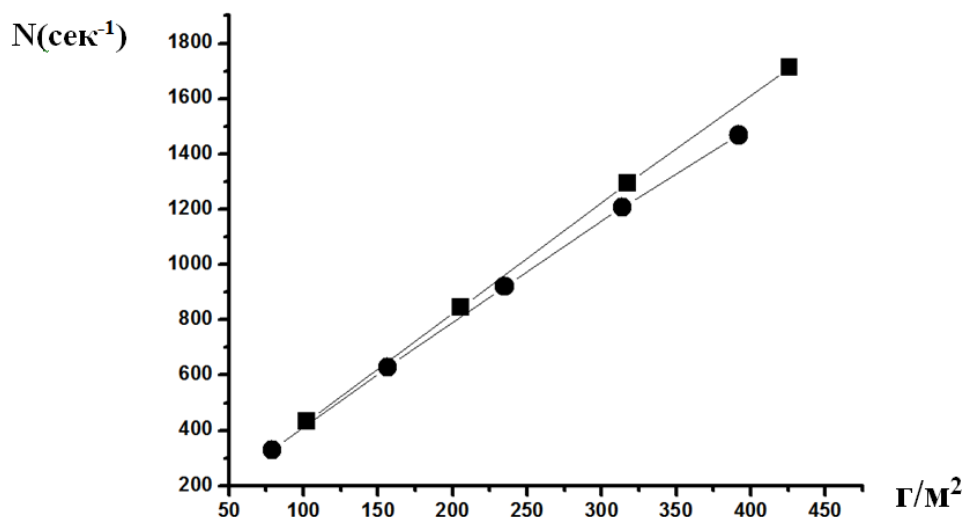


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности рассеянного излучения от величины поверхностной плотности для образцов с процентным содержанием мела -●- 26%, -■-6%.

Схема установки, на которой проводились измерения предоставлена на рисунке 3.

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

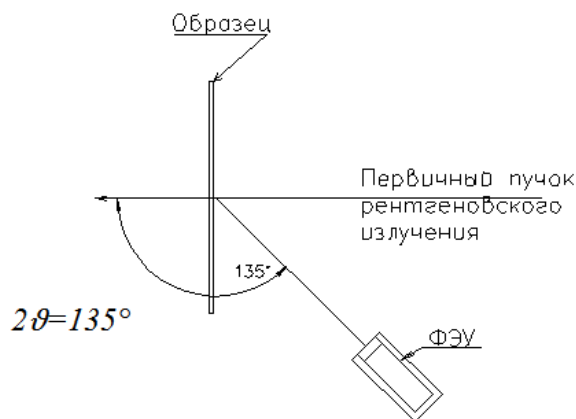


Рисунок 3 – Схема установки, на которой проводились измерения.

Источником излучения являлась рентгеновская трубка БСВ-17. Анодное напряжение 28 кэВ. Ток 120 мкА. Излучение трубки фильтровалось алюминиевым фильтром толщиной 1мм. Для регистрации рассеянного излучения применялся дозиметр ДКР – АТ1103М в счетном режиме, детектором излучения в котором является ФЭУ со сцинтиллятором NaJ(Tl).

Из графика на рисунке 2 видно, что при малых значениях поверхностной плотности разница в показаниях интенсивности рассеянного излучения от образцов с различной зольностью незначительна. Следовательно рассеяние в обратном направлении при данных условиях определяется некогерентным рассеянием. Так же заметно, что рассеяние от образца с меньшей зольностью более интенсивное, что можно объяснить большим процентным содержанием водорода.

По мере увеличения поверхностной плотности происходит отклонение графиков в сторону оси X. Отклонение для образца с большей зольностью сильнее. Данное явление объясняется большим коэффициентом поглощения рентгеновских фотонов в образце с более высокой зольностью.

Из полученных результатов следует, что для данных параметров источника и системы регистрации основным фактором, вносящим системную ошибку по измерению поверхностной плотности, является фотоэффект, значительно отличающийся для элементов целлюлозы и золы приводящий к различному ослаблению первичного и рассеянного рентгеновского излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования Республики Беларусь в рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» подпрограммы «Техническая диагностика».

#### Список литературы

1. Измерение поверхностной плотности листовых материалов радиоизотопным методом. Белячиц А. Ч., Василевич Л. Н., Говорун К. В., Кваченок В. Г., Курило Н. И., Лисовский Г. А., Титовицкий И. А. // Мат-лы междунар. н-т конф. “Приборостроение” С. 137-139. Минск 12-14 ноября 2008 г.
2. Kerry Figel, Gill John, Ross Machattie, Seyhan Nuyan, Jack Tippett. Paper Machine Quality Control Systems. – Vol 1: Measurement Systems and Product Variability// Technical Association of the Pulp & Paper. - 2010. – 120 p.
3. Методика определения массы и зольности бумажного полотна посредством рассеянного и транзитного рентгеновского излучения. / Василевич Л. Н., Ермакович О. Л., Лисовский Г. А. / Приборостроение – 2021 : Материалы 14 международной науч. – техн. конф., 17 - 19 ноября 2021г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / Минск: БНТУ, 2021 – С. 276 – 277.
4. NIST: Standard reference database126 (Last Update: July 2004); [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>

**ELECTRONIC EDUCATIONAL TECHNOLOGIES FOR DEVELOPMENT  
ALGORITHMIC THINKING IN PHYSICS AND MATHEMATICS**

<sup>1</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,  
Minsk, Belarus

A mnemonic method of learning basic physics formulas for high school students and university applicants, designed to prepare them for centralized testing, olympiads and facultative lessons in high school, has been developed.

There are many types of examinations to determine the level of knowledge in mathematics and physics in the world, for example, in the USA Sat or Act. in Germany Abitur, in Japan UECE - University Entrance Center Examination, in France baccalauréat or abbreviated BAC, in Brazil ENEM, in UK A-levels, Kazakhstan – UNT, Ukraine – ZNO, South Korea – Sunyn, Kyrgyzstan – ORT, China – Gaokao, Russia – USE, Belarus – centralized testing or CT. Centralized testing in the Republic of Belarus has been conducted since 2003 and in 2023 it will be taken by the twentieth wave of future students.

The specific feature of these exams is a big number of multilevel tasks to be solved in a limited time. Exam materials differ in the volume and complexity of the tasks and, for example, in mathematics, according to online tutors [1], the highest complexity of mathematics exams for the school course in South Korea, China, and Russia. Different countries have different levels of preparation in physics and mathematics. Data from the international TIMSS study [2] show how school curricula differ in, for example, mathematics Figure 1.



Figure 1 – Diagram indicating in which grades the mathematical concepts of rotation, reflection, and rotation of geometric figures are studied.

In the modern world of innovation, new educational practices using electronic media are being actively improved and new educational methods are being created. Nowadays some of the well-known educational methods are heuristic learning, Fishbone, Singapore educational technology, gamification, exploratory method, learning from Influencers, etc. The listed methods use different ways to carry out the learning process, the main goal of which is to achieve the maximum effect of the learning process, the rapid development of skills and abilities, the formation of a new way of thinking in a specified branch of knowledge.

ABC of Physics is a method developed on the basis of the experience of physics classes at the Belarusian State University (Minsk), Olympiads for schoolchildren and applicants, facultative classes in secondary schools. The idea of the method is to quickly memorize formula constructions, teach how to work with formulas, and form the habits of using the equations for solving problems.

For example, when asked what mass is, the student must reproduce and explain the laws and formulae listed below: Newton's second law, body momentum, the law of universal gravitation, kinetic and potential energy, density, molal quantity, RMS speed of molecules, Clapeyron-Mendeleev equation, heat on heating (cooling), pendulum, relativistic mass, mass–energy equivalence, etc.

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad p = mV, \quad F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad E_K = \frac{mV^2}{2}, \quad E_P = mgh, \quad \rho = \frac{m}{V}, \quad \frac{N}{N_A} = \nu = \frac{m}{M} = \frac{V}{22.4},$$

$$\overline{V^2} = \frac{3kT}{m_0}, \quad pV = \frac{m}{M} RT, \quad Q = cm\Delta T, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = m_0 c^2 \quad (1)$$

It is known that formulas are a scientific "foreign" language in which one must learn to think. This requires going from understanding, accepting, and recognizing the material to reliable knowledge "without remembering." "Cramming", solving numerous problems and tests, analyzing theory is the traditional way of learning formulas, which can and should be accelerated.

Making up imaginative phrases in Russian and showing accompanying pictures of formulas makes the learning process more effective. For example, the formula for the internal energy of an ideal gas can be coded with the phrase in Russian: У КаТаНы ВеТРа РѐВ U КаТаНа ВеТРа RhoV and illustrated with a picture:

$$U = \frac{3}{2} kTN = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} pV, \quad (2)$$

Developed "ABCs of Physics", "ABCs of Mathematics", "ABCs of Physics International" includes chapters on mechanics, molecular physics, electricity and magnetism, oscillations and waves, atomic and nuclear physics and offers about 300 basic formulas and over 800 advanced ones to memorize. In PowerPoint, materials are developed to teach and test the formulas of both individual physics sections and all formulas for a particular year of school physics (grades 7-11) using code in the built-in VisualBasic language. Presentations have a page for configuring teaching modes, modes of displaying tasks, allow organizing a variety of tests and generating reports. ABC of Physics and Mathematics is successfully used to train students for centralized testing in a free RF-PE school for applicants to the Faculty of RF&KT in physical electronics and radiophysics, organized on the website of the Faculty of Radio Physics and Computer Technologies of BSU.

#### Reference

1. Online resource: <https://www.youtube.com/watch?v=K6zR30ArdwA&t=2975s> MSU Mathematician, Savvateev and Raigorodsky. Access date 1.04.2023.
2. Online resource: <https://timss2019.org/reports/> TIMSS 2019 International Results in Mathematics and Science. Access date 1.04.2023.
3. Online resource: <https://didact.bsu.by> Interuniversity portal "Methodology, content, practice of creative education". Date of access 1.04.2023.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОВОРОТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Открытое акционерное общество «МНИПИ»

Разработано автоматизированное поворотное устройство, предназначенное для проведения радиофизических лабораторных исследований, испытаний радиоматериалов и электронной аппаратуры. Приведены технические характеристики, устройства. Рассмотрены области применения разработанного поворотного устройства.

Для проведения радиофизических исследований широко используются различные поворотные устройства, обеспечивающие ориентацию исследуемых объектов в пространстве. В настоящее время проблема исследования рассеивающих свойств объектов в диапазоне электромагнитных волн представляет интенсивно развивающуюся область прикладной электродинамики. Большое внимание при исследовании характеристик рассеяния отводится экспериментальным методам. В последнее время интенсивное развитие получили компактные полигоны, как эффективное средство для экспериментальных исследований рассеивающих свойств различных объектов, а также параметров антенн [1-2]. Используемые в полигонах поворотные устройства характеризуются количеством осей наведения, диапазоном углов наведения по этим осям, требованиями по размещению поворотного устройства с установленным на нем объектом, требованиями к точности и т.п.

Открытым акционерным обществом «МНИПИ» разработано автоматизированное поворотное устройство (АПУ) с программным управлением, предназначенное для дистанционного позиционирования объектов по азимутальному углу и углу места при проведении экспериментальных радиофизических исследований, измерения параметров и характеристик радиоматериалов и электронной аппаратуры различного функционального назначения: измерительных антенн, радиоприемных, радиопередающих устройств, радаров и др. (рисунок 1).



Рисунок 1 – Внешний вид АПУ

В разработанном АПУ использованы программно-управляемые шаговые приводы. Управление устройством осуществляется при помощи блока управления, подключаемого к

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

персональному компьютеру с установленным прикладным программным обеспечением, совместимым с операционной системой Microsoft Windows 10 PRO (рисунок 2).



Рисунок 2 – Блок управления АПУ

Программное управление АПУ позволяет автоматизировать процесс ориентации объектов, измерения их параметров и характеристик. Технические параметры и характеристики АПУ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические параметры и характеристики АПУ

Параметры и характеристики	Единица измерения	Значение
Диапазон углов поворота по азимуту	град.	от 0 до 360
Дискретность отсчета по азимутальному углу	град	0,5
Диапазон углов поворота по углу места	град.	от - 45 до +45
Дискретность отсчета по углу места	град	0,5
Габаритные размеры	мм	260 x 14000
Напряжение электропитания	В	230
Допустимая масса исследуемого объекта	кг	5,0
Масса устройства в сборе	кг	20,0

В комплект АПУ входят: блок управления; кабель многожильный для подключения приводов к блоку управления, плита диэлектрическая для размещения на ней исследуемых объектов; кабель коаксиальный для подключения исследуемых объектов к измерительной аппаратуре (опция) ; кабель типа «USB 2.0 Type-A/miniUSB» для подключения блока управления к ПК; кабель сетевой (230 В, 50 Гц) для подключения блока управления к электросети; CD-диск с прикладным ПО.

Разработанное АПУ выполнено с применением современных цифровых технологий и может быть использовано при выполнении экспериментальных работ при проведении радиофизических исследований, измерения параметров и характеристик радиоматериалов, электронной аппаратуры различного функционального назначения.

#### Список литературы

1. Балабуха Н. П., В. С. Солосин, А. С. Зубов - Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М., Наука, 2007.
2. Basharin A. A., Balabukha N. P., and Semenenko V. N. The radiation from a planar metamaterial waveguide // Journal of Applied Physics. 2010. V. 107, N. 113301-1-5.

## ОБ ОДНОМ ВЫСОКОТОЧНОМ РЕШЕНИИ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Институт тепло- и массообмена НАН РБ им. А. В. Лыкова, Минск, Республика Беларусь

Предложен новый подход в приближенном решении уравнения лучистой теплопроводности, когда внутренняя энергия и непрозрачность имеют степенные зависимости от плотности и температуры, а температура поверхности тела поддерживается при постоянном значении. Проведенные расчеты на основе полученных аналитических и численных решений показали высокую точность найденных аппроксимаций.

Тепловые волны, вызванные излучением, встречаются в различных астрофизических и лабораторных ситуациях и с разной степенью точности могут быть описаны в диффузионном приближении, когда тепловой поток определяется для любой заданной точки в виде локального градиента плотности лучистой энергии [1]. Несмотря на то, что современные вычислительные методы дают в ряде случаев высокоточные решения, по-прежнему сохраняет актуальность аналитический подход, дающий понимание природы рассматриваемой проблематики, а также позволяющая получать быструю оценку в экспериментальных исследованиях [2, 3]. Первый шаг в данном направлении был сделан Баренблаттом [4], исследовавшим автомодельные решения. Одно из полученных им решений дает линейно возрастающую во времени глубину проникновения тепловой волны; второе отвечает сохранению полной энергии, содержащейся в волне и остающейся постоянной после ее начального выброса в точке пространства. Последний случай подробно рассмотрен в работе Зельдовича и Райзера [5]. Два других точных решения представлены Хаммером и Розеном [5], при этом фактически повторены решения Баренблатта с заменой точки на поверхность. В работе Маршака [6] исследованы варианты получения точных решений данной задачи. Отметим также работу Паттла [7]. Приближенные аналитические решения представлены Хислетом и Алксне [8], Лонгом и Тахиром [9], Гарнье (с соавт.) [10] и в последнее время – Крифом [11].

Наше рассмотрение ограничим сверхзвуковой волной излучения, имеющей четко выраженный фронт со свойствами среды, которые задаются степенными функциями от температуры. В приближении лучистой теплопроводности (отсутствие движения, постоянство плотности среды) уравнение лучистого переноса имеет вид [5]

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} e = - \frac{\partial}{\partial x} F, \quad F = - \frac{4}{3K\rho} \frac{\partial}{\partial x} \sigma T^4 \quad (1)$$

где  $e$  – внутренняя энергия на единицу массы,  $\rho$  – плотность,  $T$  – температура,  $F$  – тепловой поток,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $K$  – средняя непрозрачность по Росселанду,  $t$  – время,  $x$  – пространственная координата. Предполагается, что  $e$  и  $K$  имеют степенную зависимость от плотности и температуры:  $e = fT^\beta/\rho^\mu$ ,  $K^{-1} = gT^\alpha/\rho^\lambda$ , где  $f$  и  $g$  – константы,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\mu$  и  $\lambda$  – показатели степени.

Рассмотрим случай, когда полупространство  $x > 0$  заполнено средой с плотностью  $\rho$ , а примыкающее к нему полупространство является пустым. Пусть начиная с момента времени  $t = 0$  «холодная» среда ( $x > 0$ ) контактирует по всей поверхности со средой при температуре  $T_0$ . Если пренебречь перемещением, то уравнение лучистого переноса принимает вид

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{K\rho} \frac{\partial \sigma T^4}{\partial x} \quad (2)$$

Подставив в него (1) с учетом  $\rho = const$ , приходим к уравнению

$$\frac{\partial T^\beta}{\partial t} = \chi \frac{\partial T^{4+\alpha}}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где  $\chi = \frac{16}{12+3\alpha} \frac{g\sigma}{f\rho^{2-\mu+\lambda}}$  – коэффициент, характеризующий тепловой поток [5].

Введя степень  $m = (4 + \alpha)/\beta$  и  $T^\beta = \theta$ , уравнение (3) запишется как

Секция 3. Прикладные проблемы радиопизики

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 \theta^m}{\partial x^2} \rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 \theta^{n+4}}{\partial x^2}, \quad (m = n + 4), \quad (4)$$

что отвечает по форме уравнению лучистой теплопроводности из работы [9]. Исходя из начальных и граничных условий имеем:

$$T(x, 0) = 0 \rightarrow \theta(x, 0) = 0, \quad x > 0, \quad (5)$$

$$T(0, t) = T_0 \rightarrow \theta(0, t) = \theta_0 = T_0^{\frac{1}{\beta}}, \quad t > 0. \quad (6)$$

В безразмерных переменных  $\theta = \theta/\theta_0$ ,  $\eta = x/\sqrt{2\chi\theta^{n+3}}$  вместо (4)–(6) получаем [9]

$$\frac{\partial^2 \theta^{n+4}}{\partial \eta^2} + \eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = 0, \quad \eta > 0, \quad (7)$$

$$\theta(0) = 1, \quad \theta(\infty) = 0. \quad (8)$$

Умножим уравнение (7) на  $\eta$  и проинтегрируем по области  $\eta = [0, \eta_0]$ , где  $\eta_0$  – фронт тепловой (радиационной) волны при  $\theta(0 \leq \eta < \eta_0) \neq 0$  и  $\theta(\eta > \eta_0) = 0$ . В итоге имеем

$$\int_0^{\eta_0} \theta(\eta) \eta d\eta = \frac{1}{2} \rightarrow \int_0^1 \theta(\xi) \xi d\xi = \frac{1}{2\eta_0^2}, \quad (\xi = \frac{\eta}{\eta_0}). \quad (9)$$

Функцию  $\theta$  опишем полиномами (в первом и втором приближениях), соответственно

$$\theta = (1 + a_1 \xi)(1 - \xi)^{\frac{1}{n+3}}, \quad \theta = (1 + a_1 \xi + a_2 \xi^2)(1 - \xi)^{\frac{1}{n+3}}. \quad (10)$$

Для определения коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  введем в рассмотрение функцию  $V = \theta^{n+3}$ , для которой из (7) получаем уравнение

$$\frac{d^2 V^{\frac{1}{n+3}}}{d\eta^2} + \eta \frac{dV^{\frac{1}{n+3}}}{d\eta} = 0 \rightarrow \frac{\eta}{n+4} \frac{dV}{d\eta} + \frac{1}{n+3} \left(\frac{dV}{d\eta}\right)^2 + V \frac{d^2 V}{d\eta^2} = 0. \quad (11)$$

Применив условие  $V(\eta_0) = 0$  (с последующим дифференцированием), находим

$$\frac{dV(\eta_0)}{d\eta} = -\frac{n+3}{n+4} \eta_0, \quad \frac{d^2 V(\eta_0)}{d\eta^2} = -\frac{n+3}{n+4}, \quad \frac{d^3 V(\eta_0)}{d\eta^3} = -\frac{(n+3)^2}{(n+4)^3 (2n+7) \eta_0}, \quad \dots \quad (12)$$

Для первого приближения получаем определяющее уравнение

$$\left(\frac{n+3}{n+4} \eta_0\right)^{\frac{1}{n+3}} + \frac{3n+10}{2(n+3)} \left[1 - \frac{(n+4)(2n+7)}{2(n+3)^2 \eta_0^2}\right] = 1. \quad (13)$$

Расчет согласно (13) при  $n = 0$  и  $3$  дает практически точный параметр  $\eta_0$ , задающий положение фронта тепловой волны:  $\eta_0 = 1.231188$  и  $1.1199365$  с ошибками всего  $0.0012\%$  и  $0.00014\%$  по сравнению с точными значениями  $\eta_0 = 1.231173$  и  $\eta_0 = 1.119935$  [9]. Таким образом, полученные решения уравнения лучистой теплопроводности с отмеченными выше приближениями при постоянстве температуры на поверхности тела можно считать высокоточными, причем даже при первом приближении.

Для первого приближения из (9) и (10) получаем окончательно

$$\theta = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)^{\frac{1}{n+3}} \left[1 + \left(\left(\frac{n+3}{n+4} s^2\right)^{\frac{1}{3+n}} - 1\right) \frac{\eta}{\eta_0}\right]. \quad (14)$$

Результаты расчета на основе приближенного решения (14) и на основе численного решения уравнения (11) представлены на рисунке 1. Графики, отвечающие аналитическому и численному решениям, практически полностью сливаются.



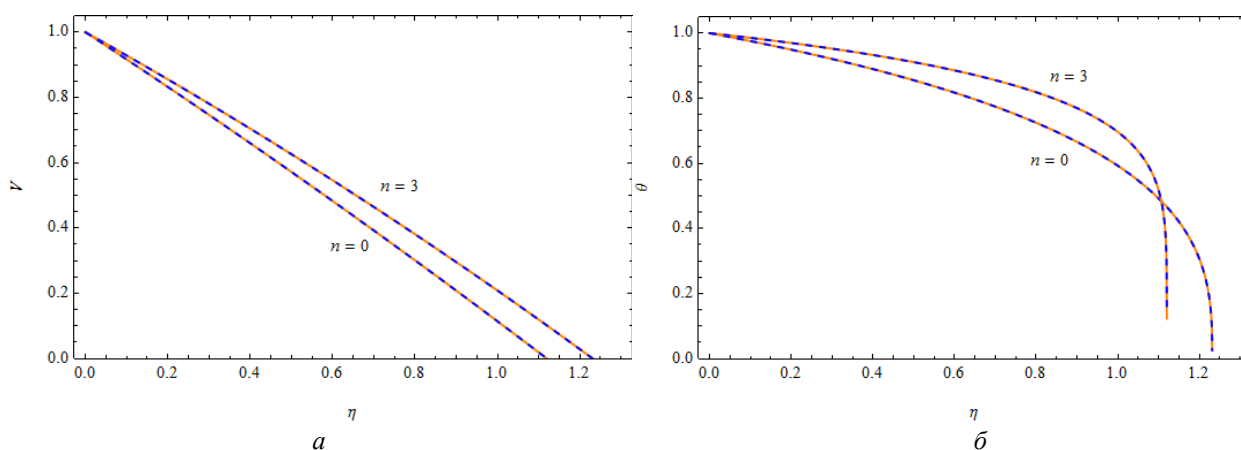


Рисунок 1 – Графики функций  $V(\eta)$  (а) и  $\theta(\eta)$  (б) на основе численного (сплошная линия) и аналитического (14) (пунктирная линия) решений при  $n = 0$  и  $n = 3$

### Список литературы

1. Hammer, J. A Consistent Approach to Solving the Radiation Diffusion Equation / J. H. Hammer, M. D. Rosen // *Phys. Plasmas*. – 2003. – Vol. 10. N 5. – P. 1829–1845.
2. Heaslet, M. A. Diffusion from a Fixed Surface with a Concentration-dependent Coefficient / M. A. Heaslet, A. Alksne // *J. Soc. Industr. Appl. Math.* – 1961. – Vol. 9. – N. 4. – P. 584–596.
3. Smith, C. C. Solutions of the radiation diffusion equation / C. C. Smith // *High Energy Density Physics*. – 2010. – Vol. 6. – P. 48–56.
4. Баренблатт, Г. И. О некоторых неустановившихся движениях жидкости и газа в пористой среде / Г. И. Баренблатт // *ПММ*. – 1952. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 67–78.
5. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер – М.: Физматлит, 2008. – 656 с.
6. Marshak, R. E. Effect of Radiation on Shock Wave Behavior / R. E. Marshak // *Phys. Fluids*. – 1958 – Vol. 1. – N 1 – P. 24–29.
7. Pattle, R. E. Diffusion from an Instantaneous Point Source with a a Concentration-dependent Coefficient / R. E. Pattle // *Quart. J. Mech. Appl. Math.* – 1959. – Vol. 12. – P. 407–409.
8. Heaslet, M. A. Diffusion from a Fixed Surface with a Concentration-dependent Coefficient / M. A. Heaslet, A. Alksne // *J. Soc. Industr. Appl. Math.* – 1961. – Vol. 9. – N. 4. – P. 584–596.
9. Long, K. F. Plasma induced energy deposition and radiation transport effects in ion beam heated plane metal targets and analytic solutions of the non-linear radiation conduction equation / K. F. Long, N. A. Tahir // *Laser and Particle Beams*. – 1986. – Vol. 4. – N 2. – P. 287–313.
10. Garnier, J. Guy Malinié, Yves Saillard, and Catherine Cherfils-Clérouin Self-similar solutions for a nonlinear radiation diffusion equation / J. Garnier, G. Malinié, Y. Saillard and C. Cherfils-Clérouin // *Phys. of Plasmas*. – 2006. – Vol.13; doi: 10.1063/1.2350167.
11. Krief, M. Analytic solutions of the nonlinear radiation diffusion equation with an instantaneous point source in non-homogeneous media / M. Krief // *Phys. Fluids*. – 2021, 057105; doi: 10.1063/5.0050422.

## ВОЛНА МАРШАКА И ФРОНТ ПРОНИКНОВЕНИЯ: ПРОСТЫЕ ВЫСОКОТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН РБ, Минск, Республика Беларусь

Рассмотрено уравнение радиационной гидродинамики, когда внутренняя энергия и непрозрачность имеют степенные зависимости от плотности и температуры. Получены высокоточные автомодельные решения для волны Маршака при степенном и экспоненциальном изменении во времени температуры поверхности тела.

Радиационные тепловые волны играют важную роль в физике плазмы и, в частности, в термоядерном синтезе с инерционным удержанием (ICF). В экспериментах с непрямым возбуждением ICF лазерные лучи освещают внутреннюю стенку резонатора с высоким  $Z$ , который предназначен для преобразования энергии лазера в рентгеновское излучение. Классическим примером нелинейной диффузии излучения является волна Маршака, впервые рассмотренная в 1958 году [1]. Решения подобного типа представляют несомненный интерес для ICF [2]. Тепловая волна, будучи автомодельной, рассматривается в приближении диффузии в материал с постоянной удельной теплоемкостью и со средней непрозрачностью по Росселанду, как степенной функции от температуры. Гидродинамическое движение не учитывается. Достаточно подробное обсуждение данной проблемы дано Михаласом [3]. Автомодельные решения получены в работах [4–6], когда в пределе твердую стенку можно считать бесконечно плотной [7]; при этом найдено разумное согласие с экспериментальными результатами [8]. Хаммер и Розен [5] предложили решения, основанные на разложении по малому параметру  $\varepsilon = \beta/(4 + \alpha)$ , когда внутренняя энергия изменяется как  $T^\beta$ , а непрозрачность – как  $T^{-\alpha}$ . Смит [9] получил автомодельные решения без учета нагретой поверхности с последующим наложением граничного условия.

Пусть при  $t \geq 0$  на поверхность пластины ( $x = 0$ ) падает излучение, в результате чего температура поверхности изменяется по степенному либо экспоненциальному законам:

$$T(0, t) = T_0(t/t_0)^k, \quad (1)$$

$$T(0, t) = T_0 e^{2kt}. \quad (2)$$

Примем постоянными плотность материала  $\rho$  и его удельную теплоемкость  $C_v$ . Для теплового потока  $F$  в любой локальной точке запишем:

$$F = -\frac{16\sigma T^3}{3k_R \rho} \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3)$$

Представим непрозрачность по Росселанду степенной функцией  $k_R = k_R(T_0)(T/T_0)^{-n}$ , причем показатель степени  $n = 0$  описывает рассеяние электронов, а значение  $n = 3$  относится к связанно-свободному либо свободно-свободному поглощению [10]. Подстановка формулы для непрозрачности в (3) дает выражение для теплового потока

$$F = -\frac{16\sigma}{3(n+4)T_0^n k_R(T_0)\rho} \frac{\partial T^{n+4}}{\partial x}. \quad (4)$$

Отсюда получаем уравнение лучистой теплопроводности (диффузии излучения)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_v} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{16\sigma}{3(n+4)T_0^n k_R(T_0)\rho} \right) \frac{\partial T^{n+4}}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T^{n+4}}{\partial x^2} \quad x > 0, \quad (5)$$

где параметр  $\chi$ , описывающий лучистую теплопроводность, задается выражением

$$\chi = \frac{16\sigma T_0^3}{3(n+4)k_R(T_0)\rho^2 C_v}. \quad (6)$$

Для решения задач (1), (5) и (2), (5) запишем искомые функции, соответственно, в виде

Секция 3. Прикладные проблемы радиопизики

$$T(x, t) = T_0 \left(\frac{t}{t_0}\right)^k \theta(\eta), \quad \eta = x/\sqrt{2\chi T_0^n t^{(n+3)k}}, \quad (7)$$

$$T(x, t) = T_0 e^{2kt} \theta(\eta), \quad \eta = x e^{2(n+3)kt}. \quad (8)$$

Подстановка (7) и (8) в уравнение (5) дает, соответственно, дифференциальные уравнения

$$\frac{\partial^2 \theta^{n+4}}{\partial \eta^2} + (1 + k(n+3))\eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - 2k\theta = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \theta^{n+4}}{\partial \eta^2} + (n+3)\eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - 2\theta = 0 \quad (10)$$

с граничными условиями  $\theta(0) = 1$ ,  $\theta(\eta)_{\eta \rightarrow \infty} = 0$ . Умножим дифференциальные уравнения (9) и (10) на  $\eta$  и проинтегрируем по частям по области  $\eta = [0, \eta_0]$ . Для параметра  $\eta_0$  имеем  $V(\eta_0) = 0$ . В итоге приходим к интегральным соотношениям, соответственно:

$$\int_0^1 \theta(\xi) \xi d\xi = \frac{1}{2(1+k(n+4))s^2}, \quad \int_0^1 \theta(\xi) \xi d\xi = \frac{1}{2(4+n)s^2}, \quad \xi = \eta/\eta_0. \quad (11)$$

Введем в рассмотрение функцию  $V = \theta^{n+3}$ . Для нее из (9)–(11) следуют дифференциальные уравнения (для граничных условий (1) и (2) соответственно):

$$\frac{1+k(n+3)}{n+4} \eta \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{1}{n+3} \left(\frac{\partial V}{\partial \eta}\right)^2 + V \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} - 2k \frac{n+3}{n+4} V = 0, \quad (12)$$

$$\frac{n+3}{n+4} \eta \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{1}{3+n} \left(\frac{\partial V}{\partial \eta}\right)^2 + V \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} - 2 \frac{n+3}{n+4} V = 0. \quad (13)$$

Применив для фронта  $\eta_0$  ( $\xi_0 = 1$ ) уравнения (12) и (13), находим, соответственно:

$$\frac{\partial V(1)}{\partial \xi} = -\frac{n+3}{n+4} (1+k(n+3))\eta_0^2, \quad \frac{\partial V(1)}{\partial \xi} = -\frac{(n+3)^2}{n+4} \eta_0^2. \quad (14)$$

Функцию  $\theta$  опишем полиномом

$$\theta = (1 + a\xi)(1 - \xi)^{\frac{1}{n+3}}. \quad (15)$$

Подстановка (16) в (12) и (15) дает определяющие трансцендентные уравнения:

$$\left(\frac{3+n}{4+n} (1+k(3+n))s^2\right)^{\frac{1}{3+n}} + \frac{10+3n}{2(3+n)} \left(1 - \frac{(4+n)(7+2n)}{2(3+n)^2(1+k(4+n))s^2}\right) = 1, \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 V^{\frac{n+4}{n+3}}}{\partial \eta^2} + (n+3)\eta \frac{\partial V^{\frac{1}{n+3}}}{\partial \eta} - 2V^{\frac{1}{n+3}} = 0. \quad (17)$$

Для степенного закона (1) получаем, в частности, решение следующего вида:

$$\theta = \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)^{\frac{1}{n+3}} \left[1 + \left(\left(\frac{(3+n)(1+k(3+n))}{4+n} s^2\right)^{\frac{1}{3+n}} - 1\right) \frac{\eta}{\eta_0}\right]. \quad (18)$$

Некоторые результаты расчета на основе (16), (18) и численного решения представлены на рисунке 1. Графики кривых для функций  $V(\eta)$  и  $\theta(\eta)$ , отвечающих аналитическому описанию согласно (18) и численному решению, полностью сливаются, что наглядно свидетельствует о высокоточном решении рассмотренной задачи о волне Маршака, отвечающей лучистой теплопроводности.

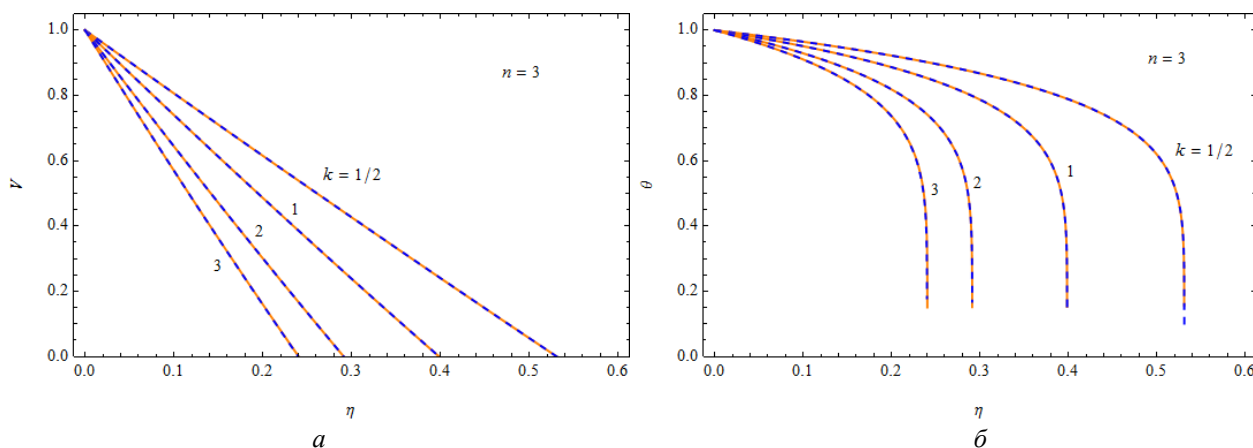


Рисунок 1 – Графики функций  $V(\eta)$  (а) и  $\theta(\eta)$  (б) на основе численного (сплошная линия) и аналитического (18) (пунктирная линия) решений применительно к граничному условию (1)

### Список литературы

1. Marshak, R. E. Effect of Radiation on Shock Wave Behavior / R. E. Marshak // Phys. Fluids. – 1958 – Vol. 1. – N 1 – P. 24–29.
2. Brun, L. Laser Interaction and Related Plasma Phenomena / L. Brun, R. Dautray, F. Delo-beau, C. Patou, F. Perrot, J.-M. Reisse, B. Sitt, and J.-P. Watteau / Plenum, New York, 1977. – Vol. 4. – P. 1059–1080.
3. Mihalas, D. Foundation of Radiation Hydrodynamics / D. Mihalas. – New York, Oxford University Press, 1984. – 718 p.
4. Heaslet, M. A. Diffusion from a Fixed Surface with a Concentration-dependent Coefficient / M. A. Heaslet, A. Alksne // J. Soc. Industr. Appl. Math. – 1961. – Vol. 9. – N. 4. – P. 584–596.
5. Hammer, J. A Consistent Approach to Solving the Radiation Diffusion Equation / J. H. Hammer, M. D. Rosen // Phys. Plasmas. – 2003. – Vol. 10. N 5. – P. 1829–1845.
6. Sanmartin, J. R. and A. Barrero, Self-similar motion of laser half-space plasmas / J. R. Sanmartin, A. Barrero // Phys. Fluids. – 1978 – Vol. 21. – N 11. – P. 1957–1966.
7. Sanz, J. A. Self-similar model for tamped ablation driven by thermal radiation / J. Sanz, J. A. R. Piriz and F. G. Tomasel // Phys. Fluids. – 1992. – Vol. 4. – N 3. – P. 683–692.
8. Sigel, R. X-ray generation in a cavity heated by laser light. III. Comparison of the experi-mental results with theoretical predictions for x-ray confinement / R. Sigel, R. Pakula, S. Sakabe and G. D. Tsakiris // Phys. Rev. A. – 1988. – Vol.38. – N. 11. – P. 5779–5785.
9. Smith, C. C. Solutions of the radiation diffusion equation / C. C. Smith // High Energy Density Physics. – 2010. – Vol. 6. – P. 48–56.
10. Castor, J. I. Radiation Hydrodynamics / J. I. Castor. – U.S. Department of Energy by Uni-versity of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2003.

УДК 621.372.83

Кочергина О. В.<sup>1</sup>, Курмашев В. И.<sup>1</sup>, Матковская Т. А.<sup>1</sup>, Тимошков Ю. В.<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛА УТЕЧКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЕНСАЦИОННОГО СПОСОБА, СОЗДАНИЕ ОСНОВ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

<sup>1</sup> УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Беларусь

<sup>2</sup> УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь

В настоящее время для передачи информации широко применяются оптические волокна. Считается, что они имеют хорошую информационную безопасность [1]. Информационный сигнал, распространяется внутри оптического волокна и доступ к нему без разрыва волокна затруднен. В настоящее время известны различные способы формирования каналов утечки информации из оптического волокна без его разрыва [2]. Одним из наиболее скрытных и эффективных среди этих способов является компенсационный. Сущность этого способа заключается в выводе части мощности информационного сигнала за пределы оптического волокна, а затем обратного ввода такой же мощности в волокно, таким образом, чтобы пользователь не обнаружил несанкционированного подключения. Вывести часть мощности сигнала за пределы оптического волокна можно с помощью изгиба, сформированного ответвителем-прищепкой. Целью исследования является реализация компенсационного съема передаваемой информации при помощи ответвителей-прищепок для различных типов оптических волокон и длин волн оптического излучения.

В качестве объектов исследований использовались одномодовые оптические волокна G.652, G.655 и G.657, так как они наиболее часто применяются в современных системах связи. Собрана экспериментальная установка, состоящая из участка оптического волокна, к обоим концам которого подключены измерители мощности. Для вывода и ввода оптического излучения с боковой поверхности оптического волокна использовались серийно выпускаемые ответвители-прищепки FOD 5503. Ввод мощности обратно в волокно осуществляется также посредством ответвителя-прищепки. Таким образом, для реализации компенсационного способа необходимо определить долю мощности ответвляемую из оптического волокна, потери мощности на ответвителе-прищепке и коэффициент ввода излучения в оптическое волокно в сторону источника оптического излучения и в сторону его получателя для длин волн оптического излучения 1310, 1490, 1550 и 1625 нм.

Получено, что увеличение длины волны приводило к росту потери мощности оптического излучения для всех исследуемых оптических волокон от  $-5,04$  до  $-1,89$  дБ для G652, от  $-0,47$  до  $-0,04$  дБ для G655 и от  $-6,22$  до  $-2,08$  дБ для G657. Наибольшее значение потери мощности соответствовало длине волны 1625 нм и волокну G655, а наименьшее – длине волны 1310 нм и волокну G657. Увеличение длины волны приводило к росту значения доли ответвляемой мощности оптического излучения с боковой поверхности оптического волокна для всех исследуемых волокон. Максимальная величина ответвляемой мощности была получена для длины волны 1625 нм и волокна G655 и составила  $-10,65$  дБ, а минимальная – для длины волны 1310 нм и волокна G657 и составила  $-20,71$  дБ. Таким образом, для уменьшения потерь мощности оптического излучения, вносимых ответвителем-прищепкой, и снижения ответвляемой ею мощности необходимо использовать для передачи информационного сигнала длину волны 1310 нм и оптическое волокно G657.

Установлено, что увеличение длины волны приводило к росту коэффициентов ввода оптического излучения, как в сторону источника оптического излучения, так и в сторону его получателя. Мощность, вводимая в оптическое волокно, распространяется не одинаково в сторону источника, и в сторону получателя для всех исследуемых длин волн. Коэффициент ввода в сторону источника принимает меньшее значение, чем коэффициент ввода в сторону

получателя. При этом, если поменять местами вход и выход ответвителя-прищепки, то ситуация изменяется на противоположную. Такое распределение мощности связано с расположением макроизгиба, созданного ответвителем-прищепкой. Чем большее расстояние проходит сигнал, тем большие потери он испытывает.

Таким образом, установлено, что реализация компенсационного метода съема информации возможна, но с учетом расположения точки ввода оптического излучения в макроизгиб. На основании проведенных исследований предложена методика оценки применимости компенсационного съема информации из оптического волокна при помощи ответвителей-прищепок.

В настоящее время демонстрируются возможности использования оптических микроэлектрохимических систем (МЭМС) для преобразования инфраструктуры оптоволоконной сети. МЭМС компоненты позволяют повысить скорость, пропускную способность и надежность оптической сети. Использование передовой элементной базы открывает новые возможности построения и интегрирования микроответвителей-прищепок в оптические каналы передачи информации [3]. Применительно к рассматриваемой задаче, будут снижены размеры ответвителей, снижены сигналы и, соответственно, возможность их обнаружения.

Разрабатывается базовая LIGA-like технология на основе фоторезиста SU-8 (Microchem, USA). Основой для построения оптических МЭМС являются микроструктуры с высоким аспектным отношением и реальные 3D компоненты (рисунок 1).

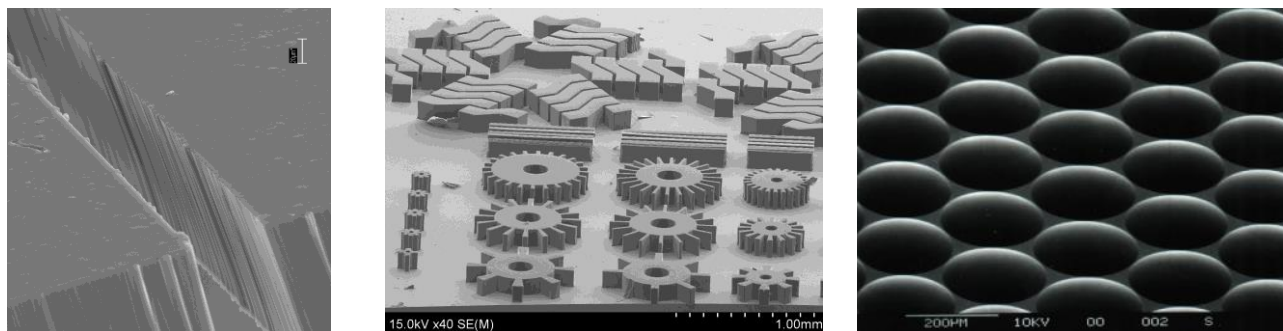


Рисунок 1 – МЭМС микроструктуры с высоким аспектным отношением и матрица микролинз.

Получены микроструктуры с аспектным отношением 1:20, толщина – до 300 мкм, минимальный размер – 10 мкм. Данная технология является базовой для создания плоских металлинз в системах передачи оптических сигналов на основе  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ . Для создания матриц микролинз разработаны основы градиентной (серой) фотолитографии.

#### Список литературы

1. Govind P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems. New York: Wiley-Interscience; 2002. 530 Pages.
2. Зеневич А. О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. – Минск: Белорусская государственная академия связи; 2017. 143 с.
3. Guangya Zhou, Chengkuo Lee Optical MEMS, Nanophotonics, and Their Applications. CRC Press, March 31, 2021. 448 Pages.

## МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Представлен сопоставительный анализ наиболее распространенных систем электропитания мощностью в сотни киловатт. На основании представленного анализа зарядных устройств электротранспорта предлагается структура наиболее экономичной и надежной системы зарядки энергоносителей мощностью в сотни кВт для пассажирского и грузового электротранспорта.

Создание мобильных систем зарядки энергоносителей является актуальной задачей развития современного пассажирского и грузового электротранспорта. Разработка мобильного источника питания повышенной экономичности и надежности поможет решить сложившуюся в Республике Беларусь проблему с зарядными станциями. Зарядные устройства большой мощности для энергоносителей электротранспорта в РБ не выпускаются, они завозятся из КНР.

Острая необходимость в таких устройствах объясняется отсутствием в Республике Беларусь серийного производства отечественных мощных зарядных станций.

Мобильные зарядные устройства необходимы для троллейбусов со «свободным ходом», т. е. троллейбусов, движущихся за счет энергии, запасенной в суперконденсаторах и аккумуляторах на протяжении десятков километров в отсутствие троллейбусного проводного электропитания.

Мобильные устройства зарядки устанавливаются непосредственно в самом транспортном средстве и запитываются непосредственно от троллейбусных силовых линий электропередач.

Для зарядки электронакопителей, т.е. суперконденсаторов и супераккумуляторов емкостью до 14 фарад и выше, обеспечивающих движение электротранспорта без питания извне, необходимы зарядные источники электроэнергии мощностью в 300-600 киловатт

Зарядка таких энергонакопителей происходит во время движения электротранспорта на участках маршрута, на которых имеются троллейбусные линии электропитания. Такой вариант обеспечивает автономность зарядки и исключает необходимость в стационарных станциях, расположенных только в определенных местах.

Кроме троллейбусов снабжение легкими компактными источниками электропитания перспективно и для электробусов, что исключает для них необходимость подъезжать к стационарным станциям зарядки.

Основными задачами разработки мобильных систем зарядки является создание высокоэкономичного и надежного мобильного источника зарядки энергонакопителей электротранспорта во время движения, а также минимизация его массы и габаритов, позволяющая рациональное размещение в ограниченном пространстве транспортного средства.

Для этого необходимо проанализировать особенности построения мобильных источников электропитания, исследовать взаимосвязи тепловых и электрических характеристик источников и надежности зарядки энергонакопителей в различных режимах работы, разработать, изготовить и испытать мобильные модули источников питания различной мощности.

Главная задача разработки устройств зарядки энергоносителей электротранспорта это обеспечение передачи мощности с наименьшими потерями и защита нагрузки от перенапряжения или перегрузки по току в случае неисправности каких-либо цепей, например, короткого замыкания и т.п.

Мобильные зарядные устройства существенным образом отличаются от стационарных систем питания.

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

Мобильные источники должны периодически подключаться ко вторичному источнику электропитания - к электроподстанциям или силовым линиям электропитания троллейбусов.

В связи с возможностью подзарядки во время движения мощность мобильных источников зарядки может быть ниже, чем мощность стационарных станций зарядки.

Так как мобильные зарядные устройства располагаются непосредственно в транспортном устройстве и занимают его определенный объем, то габариты и масса таких источников должны быть предельно минимальны.

Из существующих типов серийных источников питания таких, как феррорезонансные, тиристорные, инверторные, импульсные и др, для мобильных источников могут быть использованы только инверторные преобразователи и импульсные регуляторы тока.

Феррорезонансные источники тока просты, надежны, но очень неэкономичны и громоздки КПД этих устройств не превышает 65-70 %

Тиристорные устройства более экономичны. КПД в ряде случаев достигает 75 %. Они тоже просты в управлении и надежны в работе. Однако такие системы питания также громоздки, металлоемки и имеют недостаточный диапазон регулировки выходных параметров.

Таким образом, для мобильных систем зарядки большой мощности энергоносителей для электротранспорта наиболее применимы два типа - инверторные преобразователи и импульсные регуляторы тока

Инверторный источник питания это- преобразователь напряжения по схеме АС-DC-АС-DC. Он преобразует переменное напряжение в постоянное, затем происходит высокочастотное преобразование с импульсами прямоугольной формы, а затем вновь в постоянное. Переменное напряжение 380 В (АС) сначала выпрямляется в постоянное напряжение (DC), затем это постоянное напряжение подается на высокочастотный преобразователь с частотой до 100 кГц. Полученное высокочастотное переменное напряжение (АС) вновь преобразуется в постоянное (DC) нужной величины.

Естественно, что при таком многоступенчатом высокочастотном, преобразовании возникают значительные потери энергии. КПД инверторных устройств не превышает 75-85 %. При реализуемой мощности в сотни киловатт непроизводительные затраты в десятки киловатт приводят к непроизводительному расходу электроэнергии, перегреву аппаратуры и аварии.

Низкая надежность инверторов также объясняется тем, что высокочастотный генератор в «мостовом» или «полумостовом» виде состоит из нескольких последовательно соединенных в каждом плече силовых транзисторов и высокочастотного трансформатора в диагонали «моста».

Схемные решения с последовательно соединенными силовыми транзисторами серьезно снижают надежность устройства, т.к. допускает прохождение «сквозного тока» и, следовательно, аварию в работе источника.

Ввиду сложности схемы и большого количества силовых комплектующих источники питания такого типа мощностью в сотни киловатт менее надежны и значительно дороже других типов источников электропитания.

Для повышения экономичности, надежности и снижения массогабаритных характеристик мобильного источника зарядки энергоносителей предлагается использовать принципиальную электрическую схему импульсного типа.

Импульсные (ключевые) источники электропитания являются наиболее надежными и простыми среди современных типов источников.

Электрическая схема импульсного типа лучше других подходит для мобильных зарядных устройств по следующим причинам. Вследствие отсутствия многоступенчатого преобразования питающего напряжения энергоэффективность источника, т.е. КПД достигает 97% и более, а уменьшение количества силовых элементов схемы и исключение промежуточных блоков преобразования обуславливает повышение надежности всего устройства, уменьшаются его размеры, значительно снижается его стоимость



### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

Особым преимуществом предлагаемой системы зарядки является то, что для питания мобильного зарядного устройства достаточно использовать уже выпрямленное напряжение линии электропитания троллейбуса.

Надежность, экономичность и массогабариты импульсных зарядных устройств особенно важны для мобильных систем питания, где очень ограничено пространство для размещения дополнительных устройств охлаждения, обязательных для инверторных зарядных станций с коэффициентом полезного действия 75-85 %.

Чтобы обеспечить повышенную надежность, простоту конструкции и обслуживания, минимальные массогабаритные параметры и низкую стоимость источника, силовая электрическая схема должна использовать минимальное количество комплектующих,

Устройства зарядки энергонакопителей электротранспорта мощностью в сотни киловатт должны состоять из нескольких базовых модулей, соединенных параллельно для суммирования выходной мощности. Такая модульная схема позволяет значительно повысить надежность работы зарядной станции и предотвратить нарушение процесса зарядки. Во - первых, надежность базовых модулей, равномерно распределяющих между собой суммарную нагрузку источника, выше так, как улучшается равномерность тепловой и электрической нагрузки; во - вторых, выход из строя одного из модулей не вызовет остановку работы всего источника питания так, как модуль автоматически отключается от системы, а оставшиеся модули равномерно перераспределят нагрузку.

Для надежности работы зарядного устройства и не разрушения суперконденсаторов и супераккумуляторов мобильные источники должны обеспечивать питание электроносителей по сложной заранее задаваемой программе, включающей режимами «мягкого пуска», «мягкого выключения», стабилизацию выходных параметров и др..

Разработанная структурная схема системы зарядки мощностью 300 - кВт состоит из следующих блоков: мобильные базовые электрические модули мощностью 10 - 20 кВт (15 - 20 шт.), блоки «мягкого пуска» и «мягкого выключения» базового модуля, блок автоматического отключения базового модуля из системы питания в случае его выхода из строя, выходной датчик тока, общий блок управления и контроля.

Назначение этих блоков следующее.

1. Мобильные базовые модули обеспечивают преобразование входной электрической энергии первичного источника в выходную энергию с требуемыми напряжением и током.
2. Блоки «мягкого пуска» и «мягкого выключения» обеспечивает замедленный заряд входных силовых конденсаторов в момент включения и плавного выключения модуля, что предотвращает перегрузку по току выпрямительных диодов и тепловой удар на выпрямительные конденсаторы.
3. Блок автоматического отключения базового модуля выключает аварийный модуль из общего комплекса модулей системы зарядки энергоносителей,
4. Выходной датчик тока контролирует величину напряжения или тока, поступающих в нагрузку.
5. Общий блок управления организует работу базовых модульных блоков и всей системы зарядки энергоносителей.

Разработанная схема управления позволяет создать единую систему централизованного регулирования сотнями источников питания, позволяет запараллелить десятки базовых модулей для суммирования общей выходной мощности системы питания.

## **БАЗОВЫЙ МОДУЛЬ УСТРОЙСТВА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Описана принципиальная электрическая схема, базового модуля -устройства зарядки энергоносителей электротранспорта. В основе работы базового модуля использован принцип широтно- импульсной модуляции для регулировки выходного тока устройства электропитания. Изложены особенности разработки высоковольтных модулей питания мощностью в десятки киловатт. Представлены технические характеристики и функциональные особенности базового модуля мощностью 20 кВт для зарядки суперконденсаторов и супераккумуляторов. Базовый модуль может работать как в режиме стабилизатора и регулятора тока в нагрузке, так и в режиме стабилизатора и регулятора напряжения.

Базовый модуль является основной силовой ячейкой импульсного зарядного устройства. Это источник вторичного электропитания типа DC - DC для преобразования постоянного напряжения одной величины в постоянное напряжение другой величины. Работа такого источника основана на принципе широтно-импульсной модуляции для регулировки выходного тока. При этом регулирующим элементом является периодически замыкаемый и размыкаемый силовой электронный ключ.

Управление выходными параметрами осуществляется регулировкой ширины импульсов проходного транзистора. Транзистор находится только в двух состояниях - отсечки или открытым, практически не потребляя энергии.

При создании импульсного высоковольтного источника зарядки энергоносителей для предотвращения пробоя силовых транзисторов необходимо определить зависимость напряжения на силовых элементах от скорости нарастания тока и оптимизировать режимы работы этих элементов; определить зависимость температуры силовых элементов от скорости нарастания тока и других электрических режимов. Необходимо также оптимизировать режимы работы силовых элементов электрической схемы для повышения КПД и надежности источников зарядки, исследовать пути снижения массогабаритных характеристик источников разной мощности.

Нами использована схема импульсного источника чопперного типа, по которой постоянное питающее напряжение от первичного источника напряжения подаётся на регулирующей элемент- силовой транзистор. Последовательно с регулирующим элементом соединён рекуперирующий дроссель - интегратор, который, в свою очередь, вторым концом соединён с конденсатором выходного фильтра и нагрузкой.

При открытом силовом транзисторе в течение некоторого времени, задаваемого устройством управления, энергия от входного источника постоянного тока поступает в рекуперирующий дроссель, в котором накапливается избыточная энергия. Этот дроссель накапливает энергию, подаваемую с ключа, и отдаёт её в нагрузку, когда ключ разомкнут.

При закрытом силовом транзисторе в течение второго отрезка времени, также определяемым устройством управления, накопленная в дросселе энергия через рекуперирующий диод, подключенный к первому концу дросселя и выходу регулирующего элемента, т.е. к эмиттеру силового транзистора, передаётся в нагрузку. В результате на выходе получается усреднённое значение напряжения.

Таким образом, в импульсном стабилизаторе регулирующей элемент преобразует (модулирует) входное постоянное напряжение в серию последовательных импульсов определённой длительности и частоты, а сглаживающий фильтр, состоящий из рекуперирующего дросселя диода и выходного конденсатора демодулирует их опять в постоянное выходное напряжение.

Импульсный режим работы позволяет значительно уменьшить мощность потерь в регулирующем элементе и тем самым повысить КПД источника питания, уменьшить его массу

и габариты. В этом состоит решающее преимущество импульсных стабилизаторов перед непрерывными стабилизаторами компенсационного типа. КПД импульсных источников питания достигает 95 – 97 %, что недостижимо другими типами преобразователей электроэнергии, особенно для мощностей в десятки киловатт.

Разработанный базовый модуль состоит из следующих блоков.

1. Входной сглаживающий фильтр выпрямленного напряжения первичного источника обеспечивает мобильный модуль электрической энергией.

2. Сильноточный электронный ключ предназначен для преобразования напряжения первичного источника питания в напряжение высокой частоты. Изменением скважности импульсов сильноточного ключа, управляемого блоком управления, регулируется выходной ток в нагрузке.

Электронный ключ состоит из задающего слаботочного генератора электрических сигналов на базе микроконтроллера TL-494 и усилителя мощности, собранного на нескольких IGBT транзисторе типа GPS40B120UD и разработанный мощный скоростной драйвер с фронтами до 50 нс.

3. Система управления организует и контролирует работу всех составных узлов источника питания. Основа системы управления – микроконтроллер TL-494.

4. Рекуператор – это фиксирующий диод и дроссель с конденсатором выходного фильтра. При открытом силовом транзисторе дроссель накапливает избыточную энергию. Когда ключ разомкнут, фиксирующий диод отдаёт эту энергию в нагрузку. Используются сильноточные ультрабыстрые диоды типа 100 EPF12.

5. Система датчиков для контроля за выходными параметрами и внутренним состоянием источника являются основными элементами управления электрической схемы. Она контролирует выходные параметры каждого базового модуля системы зарядки и в случае аварии автоматически выключают его из комплекса модульных блоков.

В качестве датчиков тока для регулировки выходных параметров применены датчики Холла типа SRN-161, SRN 661 или LP 30. Такой выбор типа датчиков позволил изолировать выходные цепи источника питания от самой схемы управления источником питания.

Во время импульсного переключения тока в десятки ампер с фронтами 50-100 нс на переходах «сток- исток» силовых транзисторов возникают импульсы перенапряжения в несколько сотен вольт, что может вызвать их разрушение.

Поэтому был разработан комплекс активных и пассивных демпфирующих устройств и RCL фильтров. В результате превышение напряжения составило всего 50 – 100 В.

Разработаны, изготовлены и исследованы мобильные базовые модули постоянного тока мощностью 10 и 20 кВт, которые предназначены для зарядки энергоносителей электротранспорта во время движения.

Для примера приведены технические характеристики мобильного базового модуля системы зарядки мощностью 20 кВт:

Максимальная электрическая мощность, кВт.....	20
Пределы плавной регулировки тока нагрузки, А.....	0 – 32
Напряжение нагрузки, В.....	до 780
Напряжение питающей сети постоянного тока, В.....	до 800
Режим работы.....	продолжительный
Охлаждение устройства.....	естественное воздушное
Габаритные размеры, мм.....	210 x 110 x 290
Максимальный вес, кг.....	6

В процессе разработки проведены комплексные испытания мобильных модулей для зарядки энергоносителей электротранспорта. Испытания показали пригодность созданных устройств для зарядки суперконденсаторов и супераккумуляторов троллейбусов «со свободным ходом» и электробусов.

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

Функциональные особенности разработанных базовых модулей мобильных зарядных устройств заключаются в следующем.

Базовые модули источников питания обеспечивают питание нагрузки стабилизированным по амплитуде постоянным током или напряжением с автоматическим контролем и поддержанием заданной величины в нагрузке при колебаниях входного напряжения в пределах 20 % как в сторону увеличения, так и в сторону снижения, работу источника зарядки в режиме регулировки тока при зарядке энергоносителей электротранспорта с предварительно заданной скоростью нарастания и спада тока зарядки.

В отличие от других типов зарядных устройств большой мощности, разработанный базовый модуль может работать в импульсном режиме, при котором ток или напряжение в нагрузке изменяется во времени по сложному, заранее заданному закону изменения амплитуды, требуемым технологическим процессом.

Особым достоинством разработанных базовых модулей является наличие в их цикле работы режима «мягкого пуска» зарядки и «мягкого выключения» после полного заряда суперконденсаторов и аккумуляторов.

Такой режим необходим для предотвращения «жесткого» режима заряда энергоносителей и их разрушения; а также выхода из строя всей системы зарядки.

Режим «мягкого пуска» обязателен для работы зарядного устройства. Электрическая ёмкость энергоносителей электротранспорта составляет 14 и более фарад. В начальный период зарядки, когда конденсаторы и аккумуляторы разряжены, их электрическое сопротивление низкое. Поэтому в это время ток заряда должен быть ограничен.

Система управления базового модуля обеспечивает контроль амплитуды, длительности и формы тока заряда, контроль и защиту устройства от аварии.

При работе базового модуля зарядки необходимо строгое выполнение очередности включения и отключения входящих в источник отдельных блоков; Это связано с коммутацией большой электроэнергии и нарушение порядка очередности включения может вызвать аварийную ситуацию на электроподстанции и остановку движения троллейбусов на маршруте.

Схема управления базового модуля позволяет параллельное соединение входов и выходов базовых модулей для суммирования электрической мощности всей системы электропитания.

Преимущество разработанных мобильных базовых модулей системы электропитания в том, что они обладают более высокой надежностью и экономичностью работы по сравнению с серийными источниками зарядки энергоносителей, они имеют меньшие масса - габаритные характеристики и стоимость при тех же мощностях.

Повышение надежности в сравнении с серийными инверторными типами зарядных устройств достигнуто тем, что, в электронной схеме исключены ВЧ- преобразователи и трансформаторы, которые сложны в изготовлении и являются наиболее ненадежными элементами вторичных источников питания.

Принципиальная электрическая схема разработанных источников в сравнении с серийными инверторными устройствами, поставляемыми в Республику Беларусь, например, КНР содержит значительно меньше электронных компонентов, особенно меньше силовых транзисторов (в четыре раза), которые являются наиболее тепло- и электронагруженными элементами устройства.

Повышение экономичности достигнуто применением широтно- импульсного метода управления током, исключением поглощающих энергию б дросселей. Поэтому КПД разработанных модулей составляет 93 -95% в зависимости от режимов работы устройства.

Разработанная система зарядки универсальна и может применяться как для мобильных устройств, размещаемых в самом транспортном средстве, так и в стационарных станциях на пунктах зарядки энергоносителей электротранспорта.

## МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛЕНТ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Численно исследовано взаимодействие плоской электромагнитной волны с метаповерхностями, элементы которых состоят из металлодиэлектрических лент различной конфигурации. Установлено, что замена сплошных проводников слоистыми металлодиэлектрическими структурами, а также использование металлических перемычек между лентами позволяет существенно расширить электромагнитные свойства метаповерхностей и метаматериалов.

Метаматериалы и метаповерхности представляют большой интерес для разработки электродинамических систем различного назначения (частотно-селективных поверхностей, пространственно-поляризационных фильтров, поляризаторов, радиопоглощающих материалов и покрытий) [1-3].

На основе метода минимальных автономных блоков [4], метода конечных интегралов [5] и теории периодических структур [6] разработаны вычислительные модели метаповерхностей в виде плоских периодических решеток из элементов, образованных из параллельных металлических лент, пространство между которыми заполнено диэлектриком. Форма элементов может быть произвольной. В состав структурных элементов метаповерхностей могут входить металлические перемычки.

На базе разработанных вычислительных моделей исследовано взаимодействие плоской линейно поляризованной электромагнитной волны с метаповерхностями, в состав которых входят угловые элементы, плоские и объемные спирали, омега-частицы. Рассмотрено влияние слоистости элементов и наличие металлических перемычек между лентами на электромагнитные свойства метаповерхностей.

В качестве примера исследованных структур рассмотрим взаимодействие плоской линейно поляризованной электромагнитной волны с метаповерхностью, элементами которой являются омега-частицы из слоистых металлодиэлектрических лент. Фрагмент метаповерхности представлен на рисунке 1.

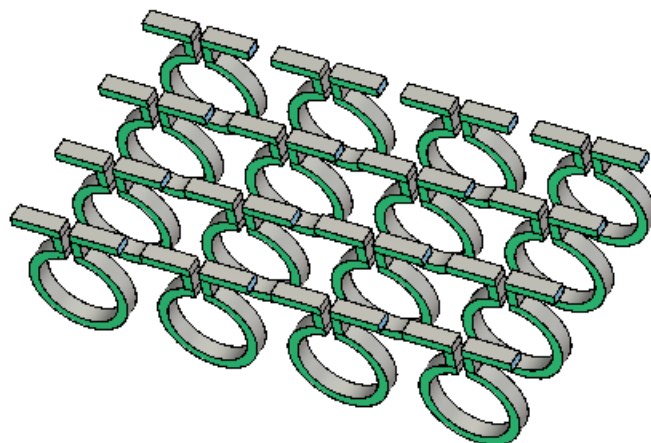


Рисунок 1 – Метаповерхность из омега-частиц.

Омега-частицы широко используются в составе композитов, метаматериалов и метаповерхностей с бианизотропными свойствами. За счет формы частиц в них реализуется магнитоэлектрическое взаимодействие электрической и магнитной компонент электромагнитного поля. Обычно омега-частицы изготавливаются из проводника круглого или прямоугольного сечения. Использование вместо сплошных проводников металлодиэлектрических лент позволяет осуществлять управление свойствами метаповерхностей не только за счет конструк-

ционных параметров омега-частиц, но и путем изменения диэлектрической проницаемости материала между металлическими лентами, введением проводящих перемычек на торцах и во внутренней области лент. Ниже представлены результаты моделирования для однослойных решеток из омега-частиц со следующими конструкционными параметрами: толщина металлической ленты равна 0.1 мм; ширина металлической ленты равна 5 мм; радиусы внешнего и внутреннего металлических колец соответственно равны 15 и 14 мм; длины прямолинейных полосков равны радиусу внешнего кольца.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты моделирования для структуры, в которой внутренний слой лент соответствует вакууму. Рассмотрено два варианта метаповерхности, различающиеся наличием и отсутствием металлических прямоугольных пластин на торцах лент омега-частиц.

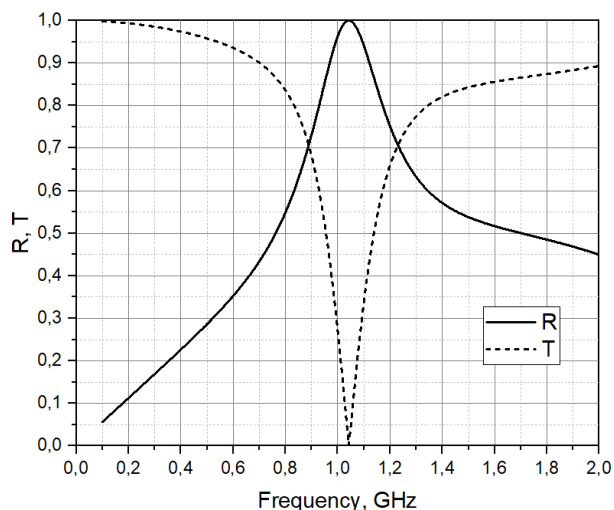


Рисунок 2 – Частотная зависимость модуля коэффициентов отражения и прохождения для метаповерхности из слоистых омега-частиц с металлизированными торцами.

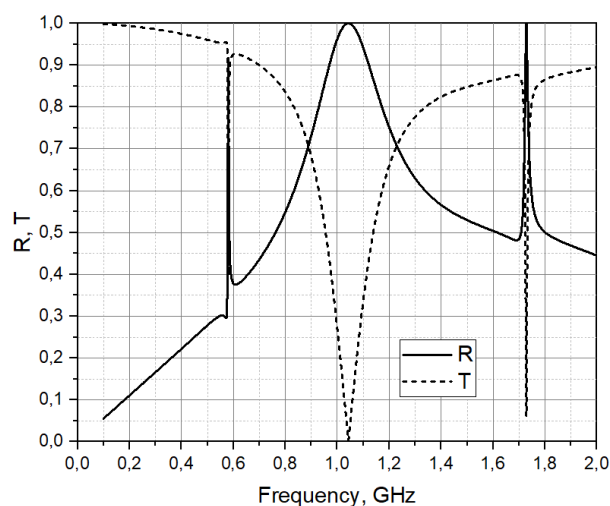


Рисунок 3 – Частотная зависимость модуля коэффициентов отражения и прохождения для метаповерхности из слоистых омега-частиц с одним металлизированным торцом.

Анализ результатов моделирования подтверждает возможность использования слоистых металлодиэлектрических лент для расширения электромагнитных свойств метаповерхностей и метаматериалов. Слоистость лент приводит к возникновению дополнительных резонансов в частотной зависимости коэффициентов отражения и прохождения, обусловленных интерференцией электромагнитного поля, возбуждаемого наведенными электрическими токами на поверхности металлических лент, и полей, сосредоточенных между металлическими лентами. Металлические перемычки, соединяющие ленты, позволяют управлять резонансными частотами полосковых резонаторов, образованных лентами.

#### Список литературы

1. B. Munk, *Frequency-Selective Surfaces: Theory and Design*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2000.– 410 p.
2. Nader Engheta and Richard W. Ziolkowski. *Metamaterials: physics and engineering explorations*. Wiley. – 2006.
3. K. Achouri and C. Caloz, *Electromagnetic Metasurfaces: Theory and Applications*. Wiley - IEEE Press. – 2021.
4. Никольский В. В., Никольская Т. И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. -М.: Наука, 1983.-304 с.
5. M. Clemens, T. Weiland, "Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique"// *Progress In Electromagnetics Research, PIER 32*, 2001.– P. 65–87
6. N. Amitay, V. Galindo, and C. P. Wu, *Theory and Analysis of Phased Array Antennas*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 1972.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ПО СПЭЯ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, – Минск, Беларусь

Автоматизация процессов имеет важное значение с точки зрения снижения затрат рабочего времени и устранения риска возникновения ошибок оператора из-за проведения достаточно большого количества измерений и расчётов. В работе описана реализация автоматизации процесса калибровки фотометрической сферы позволяющая снизить затраты времени по сбору данных в 5 раз, а время, затраченное на обработку данных в 192 раза.

Для корректного проведения калибровки фотометрической сферы по СПЭЯ существует соответствующая методика. На основе методики было разработано специальное программное обеспечение (СПО) «КАМЕЯ» позволяющее реализовать автоматизацию компарирования сигнала фотометрической сферы. В данном докладе будет описано как происходит процесс автоматической калибровки на примере фотометрической сферы ДИ-12, рабочего эталона ДИ-1 и пальчиковых ламп линейчатого спектра Oriel (Hg, Ar) и показаны результаты калибровки.

В состав оборудования данного комплекса входит (рисунок 1):

- 1) Фотометрическая сфера ДИ-12 (в данном случае калибруемая сфера)
- 2) Протяженный источник излучения сплошного спектра с известным распределением СПЭЯ (сфера ДИ-1 (рабочий эталон)).
- 3) Лампы линейчатого спектра (Hg, Ar).
- 4) Компаратор (SOLAR M150) с двумя установленными детекторами:
  - а) охлаждаемая ПЗС-матрица (Hamamatsu S7031-1006S (размер пикселя 24 мкм, количество пикселей 1024×58, разрядность 16 бит) для диапазона 400 – 1050 нм;
  - б) охлаждаемая ПЗС-матрица Hamamatsu G9208-256, (размер пикселя 50×250 мкм, 256 пикселей, разрядность 16 бит) для диапазона 1000 – 2500 нм.
- 5) Оптическая поворотная платформа Standa 8MR 190-90-59.
- 6) Четыре блока питания CPX400DP с возможностью управления по сети ethernet.
- 7) Коммутатор.
- 8) Персональный компьютер и установленное на нём СПО «КАМЕЯ».

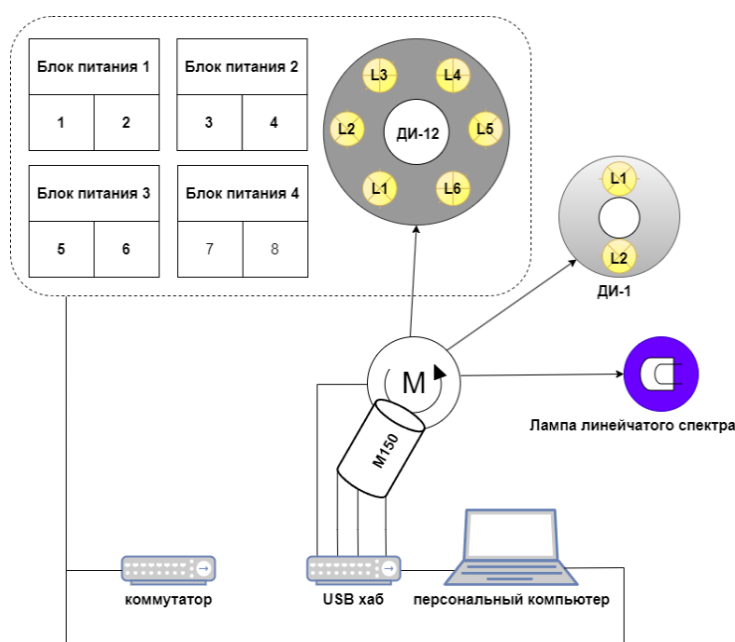


Рисунок 1 – Общая схема установки для автоматизации калибровки сферы ДИ-12 по СПЭЯ

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

Работа СПО выполняется согласно логической схеме (рисунок 3). При старте программы происходит инициализация переменных из текстового файла в формате JSON. После чего запускается процесс вывода ламп фотометрической сферы ДИ-12 на рабочий режим согласно конфигурационному файлу в JSON формате. Далее происходит сбор спектральных данных и темного сигнала для каждой центральной длины волны для каждого источника (ДИ-1, ДИ-12, лампы линейчатого спектра) с оптимальной выдержкой. Полезный и темновой сигнал регистрируется 10 раз для каждой длины волны. Затем выключается одна лампа и вышеописанная процедура повторяется до тех пор, пока все шесть ламп ДИ-12 не будут выключены.

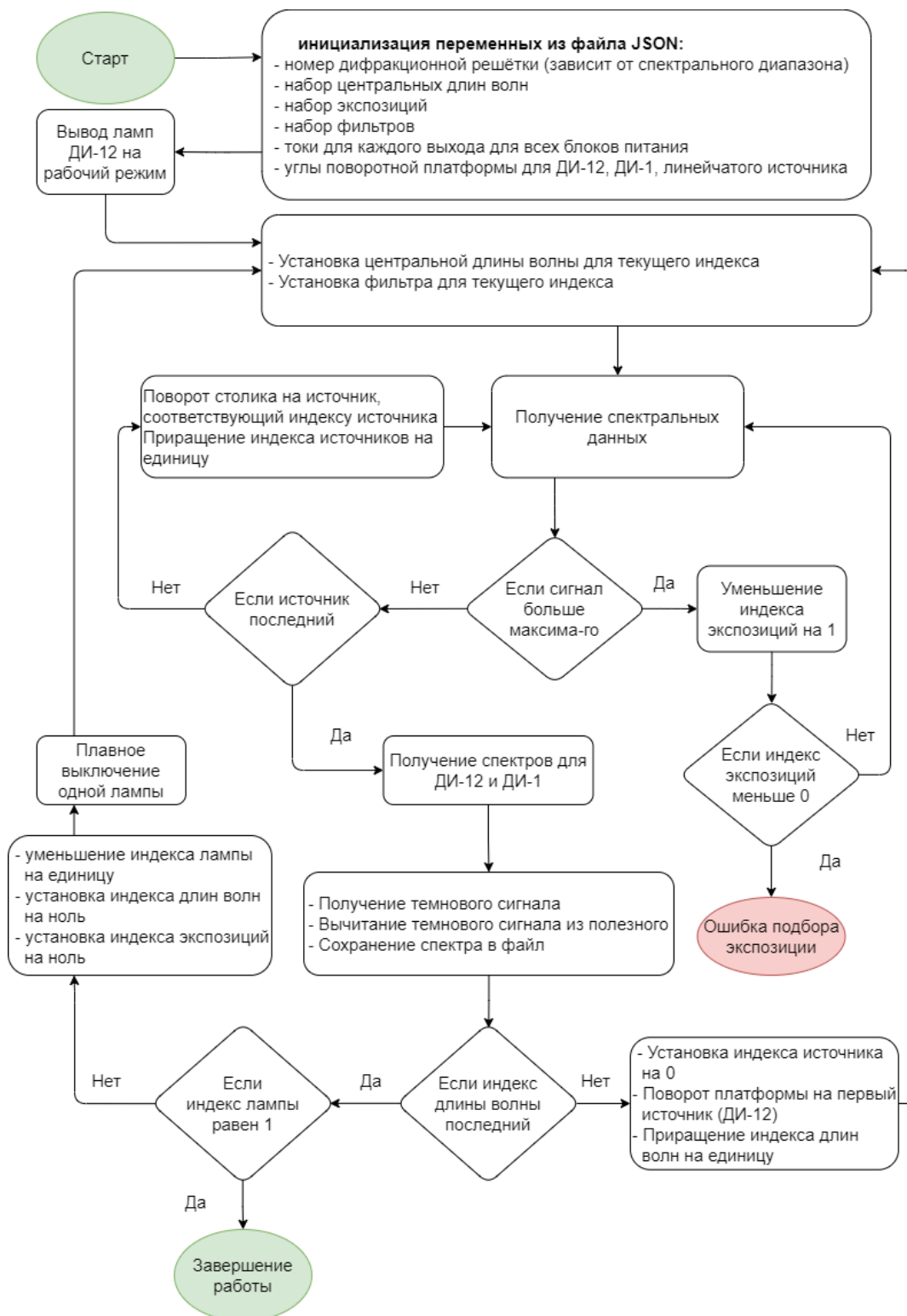


Рисунок 2 – Общая логическая схема работы СПО «КАМЕЯ»



### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

После сбора спектральных данных выполняется:

- 1) калибровка приёмника по длинам волн на основании данных, собранных для лампы линейчатого спектра.
- 2) расчёт среднего значения полезного сигнала для каждого канала приёмника и его среднеквадратичное отклонение.
- 3) расчёт среднего значения темнового сигнала для каждого канала приёмника и его среднеквадратичное отклонение.
- 4) расчёт чистого сигнала ДИ-12 (из среднего значения полезного сигнала вычитается средний темновой сигнал).
- 5) находится соотношение яркости рабочего эталона и ДИ-12.
- 6) строится график (рисунок 2), при помощи которого можно убедиться в монотонности полученных зависимостей.
- 7) расчёт расширенной относительной неопределённости для оценки точности измерений.

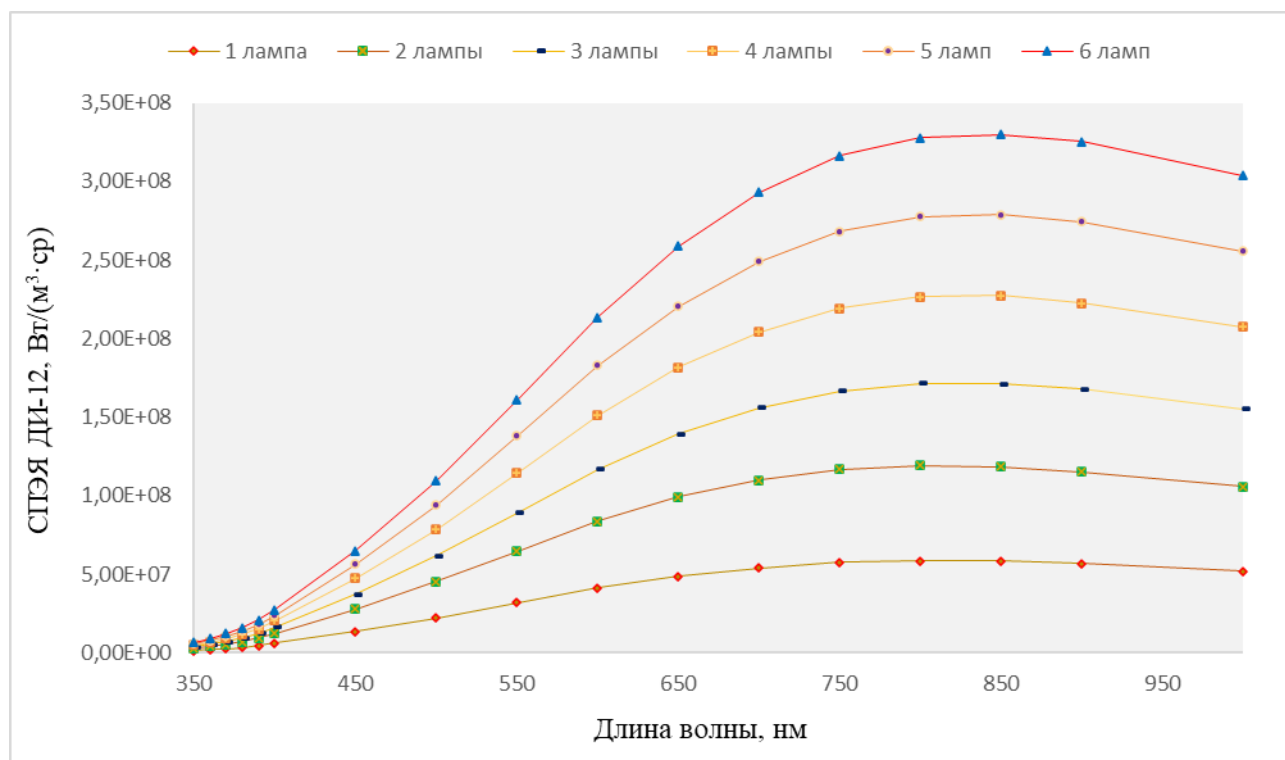


Рисунок 2 – Графики СПЭЯ для шести вариантов включенных ламп ДИ-12

#### Заключение

В работе представлен эффективный способ экономии невозобновляемого ресурса - времени за счёт делегирования задач по сбору и обработке данных самодействующей системе на примере автоматизации калибровки фотометрической сферы по СПЭЯ. Временные затраты на сбор данных уменьшены в 5,3 раз (с 3 рабочих дней до 4,5 часов), а на обработку данных в 192 раза (с 2 рабочих дней до 5 минут). Так же был устранён риск возникновения ошибок оператора во время сбора и обработки данных. Суммарная экономия времени составила 35,42 часа. Суммарная средняя общая относительная неопределённость расчёта СПЭЯ составила не более 3,68%.

#### Список литературы

1. А.Н Зайдель, В.К. Прокофьев, С.М. Райский, В.А, Славный, Е.Я. Шрейдер Таблицы спектральных линий // Издательство «Наука». – 1969. – С. 506-508
2. NIST National Institute of Standards and Technology – URL: [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ШИРОКОАПЕРТУРНОЙ АНТЕННЫ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Представлены метод измерения диаграммы направленности антенны (ДН) и структурная схема измерения ДН в дальней зоне с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Отличительной особенностью предполагаемого метода является в определении качества исследуемой антенны.

Измерение диаграммы направленности антенны является важной и актуальной научно-технической задачей в области радиосистем. Ключевые моменты при разработке антенны является измерение её характеристик, то есть мощность излучения, а для этого надо мерить диаграмму направленности [1].

Традиционно измерения диаграммы направленности антенны проводились в безэховой камере, которая представляет собой изолированную комнату со стенами, поглощающими радиоволны для предотвращения каких-либо внешних помех. Однако для антенн с большими апертурами для точного измерения ДН желательно иметь точечный источник в дальней зоне, которая располагается от нескольких десятков метров до нескольких километров от антенны. Естественно, при увеличении расстояния необходимо увеличивать размер безэховой камеры, что является дорогостоящим и трудоёмким процессом. Для исключения этих недостатков был выбран БПЛА в качестве измерительного аппаратного устройства. За последние годы измерение ДН с помощью БПЛА является распространенным, практичным и дешёвым по сравнению с безэховой камерой. С помощью аппарата можно проводить измерения в свободном пространстве (на улице), где, собственно, есть возможность расположить точечный источник на большое расстояние от исследуемой антенны (АУТ) [2]. К аппарату устанавливается точечный источник излучения (излучающая антенна), и распространяет электромагнитное излучение в сторону АУТ в виде волнового фронта. Полученные результаты мощностей можно построить диаграмму направленности в виде полярной или декартовой системе координат.

В полевых условиях активные применения методов измерения ДН являются:

- тестовый сигнал радиопередающего оборудования БПЛА к АУТ (когда БПЛА отправляет тестовый сигнал с известной мощностью к АУТ);
- тестовый сигнал АУТ к БПЛА (тестовый сигнал с известным параметром отправляется к БПЛА из АУТ).

В работе представлен другой метод измерения ДН - сигнал переотражённый от поверхности АУТ (рисунок 1).

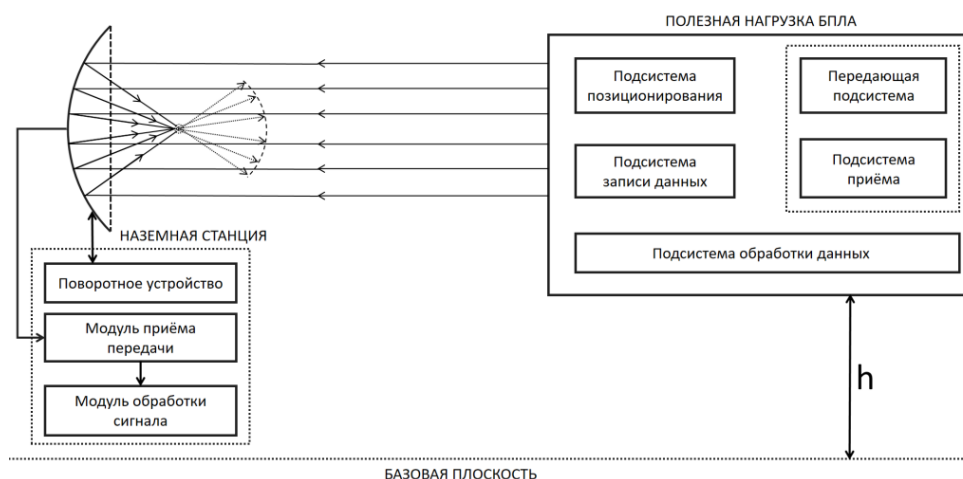


Рисунок 1 – Схема метода восстановления ДН при переотражении тестового сигнала от поверхности АУТ

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

БПЛА отправляет тестовый сигнал, и этот сигнал отражается от поверхности АУТ, следуя обратно к БПЛА. Особенностью данного метода состоит в том, что с помощью результата измерения можно провести диагностику АУТ в наличии дефектов в апертуре.

Для измерения необходимо выполнить систему обнаружения мощности сигнала. Система состоит из трёх модулей: модуля приема сигнала, модуля обнаружения мощности и модуля обработки данных. Принцип этой системы обнаружения показан на рисунке 2. Во-первых, электромагнитное излучение принимается приемной антенной, установленной на БПЛА, и передается в модуль обнаружения мощности. Затем детектор мощности в модуль обработки данных в виде аналогового сигнала. После этого аналого-цифровой преобразователь преобразует аналоговый сигнал в цифровой и передает его на микроконтроллер [3].

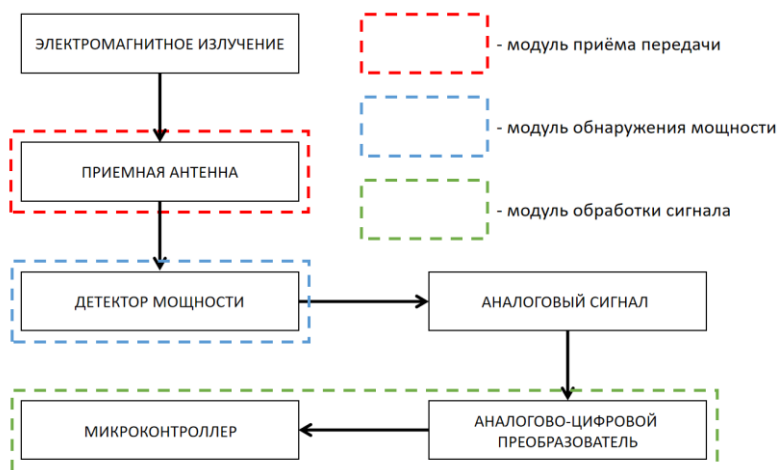


Рисунок 2 – Принцип работы системы обнаружения мощности сигнала

Исходя из рисунка 1 необходимо расположить микроконтроллер на БПЛА, в роли подсистемы записи данных. В таких случаях необходимо создать условие удалённого подключения ПК с микроконтроллером. На рисунке 3 приведена схема подключения ПК к микроконтроллеру через радиомодуль HC-12.

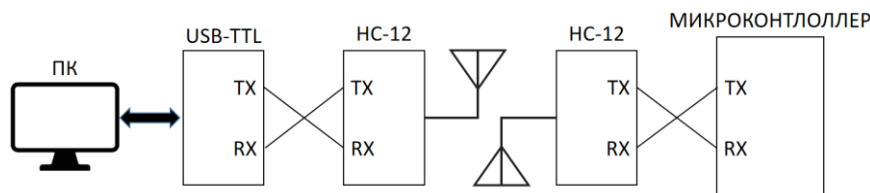


Рисунок 3 – Схема подключения ПК с микроконтроллером через радиомодуль HC-12

По умолчанию у обоих радиомодулей установлены частота 433,4 МГц, что позволяет подключиться к нужному радиомодулю. Так как для эксперимента был выбран частота 1-2 ГГц (L-диапазон), не возникнут проблемы с подключением. Максимальная дальность радиомодуля составляет 1 км, что является необходимым для подключения к микроконтроллеру в дальней зоне. Подключение осуществляется через программы PuTTY.

В наличии нескольких устройств для измерения ДН, указанных на рисунках 2 и 3, сильно сказывается на увеличении полезной нагрузки. Естественно, что для работы необходимо выбрать или создать БПЛА, который сможет поднять полезную нагрузку. В роли БПЛА был выбран квадрокоптер Phantom 4 advanced, который сможет поднять полезную нагрузку весом 500 грамм. Также преимущество в выборе этого квадрокоптера состоит в наличии пульта дистанционного управления, необходимым для построения траектории полета БПЛА, и в наличии камеры, установленной на квадрокоптере. Излучающая и приемная антенна будет располагаться и направляться на ту сторону, куда направлена камера по умолчанию. На основе камеры, которая за весь промежуток времени измерения ДН на основе тра-

### Секция 3. Прикладные проблемы радиофизики

ектории полета БПЛА, будет направлена в сторону АУТ для точной передачи и приема антенны, установленной на БПЛА.

На основе рисунков 2 и рисунка 3 представлена предварительная структурная схема измерения ДН с помощью БПЛА (рисунок 4).

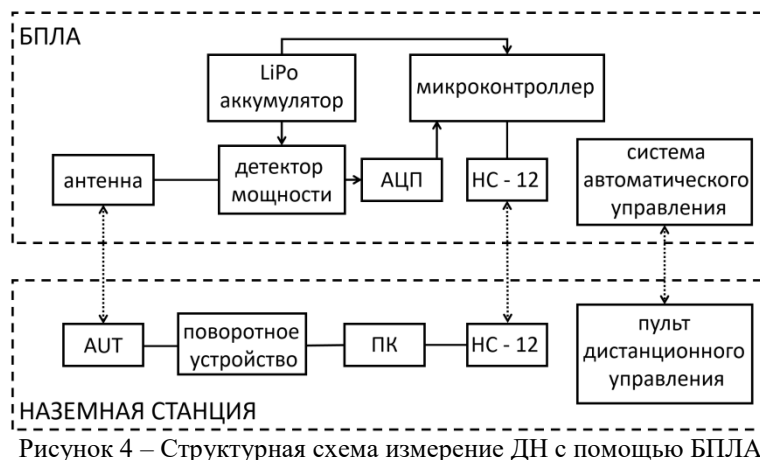


Рисунок 4 – Структурная схема измерения ДН с помощью БПЛА

На рисунке 4 видно, что через пульт дистанционного управления БПЛА будет лететь по заданной траектории автоматически на основе программного обеспечения. В качестве роли устройств были выбраны следующие:

- микроконтроллер NanoPi Neo Core2 (вес - 40 г, размерность - 40 x 40 мм.);
- AD8318 детектор мощности (вес - 46 г, размерность - 50 x 30 мм., рабочая частота - 1-8000 МГц);
- аналого-цифровой преобразователь ADS1110A0IDBVR (вес - 0.1 г);
- поворотное устройство в виде шагового двигателя;
- широкоапертурная антенна (АУТ), расположенная на крыше НИИ ПФП (рисунок 5).



Рисунок 5 – Широкоапертурная антенна

#### Список литературы

1 Oh Suchan. "Simulation of motion of an unmanned aerial vehicle for measuring purposes and prototyping of its kinematic diagram." Black Sea Science 2021: Proceedings of the International Competition of Student Scientific Works. Information Technology, Automation and Robotics. Odessa National Academy of Food Technologies. Odessa: ONAFT, 2021. – p. 312 – 320.

2 María García-Fernández, Yuri Álvarez López, Ana Arbolea, Borja González-Valdés, Yolanda Rodríguez-Vaqueiro, María Elena De Cos Gómez, Fernando Las-Heras Andrés (2017). "Antenna Diagnostics and Characterization Using Unmanned Aerial Vehicles." IEEE Access (Volume: 5), p. 23563 – 23575.

3 Qingying Ren, Wen Zuo, Jie Xu, Leisheng Jin, Wei Li and Debo Wang (2021). "Design of a Microwave Power Detection System in the 5G-Communication Frequency Band." Sensors 2021, 21(8), 2674.

## МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МИКРОЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Могилевский государственный университет имени А.А. Кулешова, Могилев, Беларусь

Представлены результаты анализа полуклассической модели генерации излучения в лазере пониженной размерности и – на её основе – численного моделирования режима регулярных пульсаций, возникающего в условиях нелинейного смещения и уширения резонансной линии усиления из-за влияния ближних полей диполей и поглощения в квазирезонансных переходах на диэлектрическую восприимчивость активной среды. Моделирование проведено для параметров полупроводниковых квантоворазмерных структур.

Известно, что в последнее время в качестве искусственных активных сред интенсивно разрабатываются так называемые суперкристаллы (СК) с внутренней структурой, формируемой упорядоченным ансамблем квантовых точек (мета-атомов, то есть образований, превышающих обычный размер атома, подобных экситонам) с дискретными свойствами энергетического спектра [1]. Характерность СК выражена тем, что в их структуре может быть достигнута относительно высокая плотность активных центров в виде квантовых точек (КТ). Подобные активные полупроводниковые материалы на основе КТ перспективны для применения в микролазерах [2], пригодных для использования в устройствах нанофотоники.

В условиях высокой концентрации дипольных центров значимо влияние ближних полей диполей и поглощения в квазирезонансных переходах на диэлектрическую восприимчивость и, соответственно, на кинетику резонансного отклика СК. Обусловленные этими условиями нелинейное смещение резонанса усиления и уширение частоты светового поля обладают особой динамикой, для которой характерна обратимость этих процессов в ходе резонансных колебаний инверсии. В работе, положенной в основу настоящего сообщения, представлена и проанализирована для параметров квантоворазмерных полупроводниковых структур модель генерации микролазера, учитывающая обозначенные нелинейные фазовые эффекты. Их действие в условиях различия времён реакции вещества активного слоя в каналах накачки, межзонной и внутризонной (фазовой) релаксации выступает в качестве внутреннего дестабилизирующего фактора, способного вызвать оптическую бистабильность и осцилляции материального отклика ансамбля КТ и самопроизвольное возникновение регулярных режимов свечения в субнано- и пикосекундном диапазоне.

**Основные уравнения.** Для анализа динамики плосковолнового поля в оптических структурах пониженной размерности приемлемо приближение особо тонкого слоя резонансных атомов с присущим ему допущением продольно-однородного поля. По аналогии с [3], но с применением представлений обобщённой двухуровневой схемы, предложена модификация кинетической системы, образованная прежде всего квантовомеханическими уравнениями Блоха для квазистационарной комплексной амплитуды поляризованности  $\rho(\tau) = (R + iS)/\sqrt{\tau_{12}}$  и вероятности инверсии  $n$ . В качестве уравнений связи полей в записи системы использованы электродинамические соотношения для нормированных напряжённостей инициирующего и действующего на КТ световых полей, рассматриваемые в приближении тонкого слоя и, помимо нерезонансных составляющих, включающие активные сверхизлучательные компоненты с резонансной и квазирезонансной поляризованностью. При постоянном уровне возбуждения кинетическая система представляется в таком виде:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{d\tau} &= [1 - \beta\gamma(\kappa n - 1)]n\epsilon_i + (\kappa n - 1)(R - \Delta S), & \frac{dS}{d\tau} &= -(\kappa n - 1)(\beta n\epsilon_i - \Delta R - S), & \Delta &= \gamma - \beta(1 + \gamma^2)\kappa n, \\ \tau_{12} \frac{dn}{d\tau} &= 1 - n - [R - \beta(\kappa n - 1)(\gamma R + S)]\epsilon_i - \kappa(R^2 + S^2), & U_r &= \left[ (1 - \beta\gamma(\kappa n - 1))^2 + \beta^2(\kappa n - 1)^2 \right] (R^2 + S^2). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $e_i$  – нормированное инициирующее поле, возникающее из спонтанных флуктуаций поля в среде активного слоя на частоте перехода  $\omega$ ,  $\kappa = \mu^2 N l \omega T_2 / \varepsilon_0 \hbar c$  – показатель усиления инверсного слоя, максимальный при данном уровне накачки,  $\tau_{12} = T_1 / T_2$  – отношение времён межзонной ( $T_1$ ) и внутризонной ( $T_2$ ) релаксации перехода (по величине  $T_2$  в системе (1) нормировано время),  $\mu$  – средний дипольный момент активных центров,  $N$  – их объёмная плотность. Нормирующий коэффициент  $\gamma$  в обусловленной учётом локальной поправки нелинейной отстройке частоты  $\Delta$  пропорционален отношению длины волны  $\lambda$  поля излучения и толщины активного слоя  $l$ . Фактор квазирезонансной поляризации, вызывающей автомодуляционное уширение поля, в представлении (1) с коэффициентом пропорциональности  $\Delta\alpha$  (дефектом поляризуемости) зависит от резонансной вариации усиления и учитывается в уравнениях компонентами с коэффициентом  $\beta = 2\pi\Delta\alpha\varepsilon_0\hbar/\mu^2T_2$ , известным также как параметр резонансной нелинейной рефракции (в лазерных средах на основе полупроводников – фактор Хенри). Плотность поля выходного излучения  $U_r$  определяется сверхизлучательным компонентом в электродинамических условиях и нормирована по мощности насыщения (аналогично нормировано инициирующее поле  $e_i$ ).

**Свойства равновесных состояний модели.** Модель энергообмена накачки и квантовой системы (1) с продольно-однородным резонансным полем имеет, безусловно, приближённый характер. Однако она позволяет выяснить роль динамики процессов наведения поляризации в общем балансе энергообмена поля в среде и накачки в ходе генерации на основе схемы с тремя степенями свободы. Благодаря этому относительно просто можно применять методы качественного анализа устойчивости стационарных состояний к определению возможности достижения практически интересных режимов излучения. Применение схемы баланса (1) в аспекте нашей работы позволило определить условия автоколебаний и моделировать режим самоподдерживающихся пульсаций при постоянной накачке.

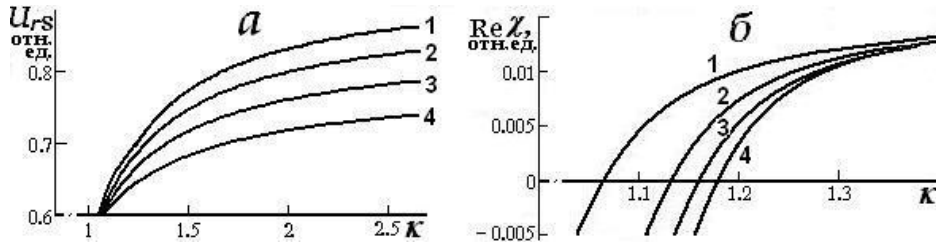
Стационарные решения для  $R_s, S_s$  и  $n_s$ , вытекающие из соотношений для сингулярных пределов (1) при постоянном уровне инициирующего поля  $e_i$ , характеризуют равновесные состояния модели и определяются следующими выражениями:

$$n_s - n_s^2 = R_s^2 + S_s^2, \quad R_s = \frac{\beta(\kappa n_s - 1)(\gamma + \Delta_s) - 1}{(\kappa n_s - 1)(1 + \Delta_s^2)} n_s e_i, \quad S_s = \frac{\beta(\kappa n_s - 1)(1 - \gamma\Delta_s) + \Delta_s}{(\kappa n_s - 1)(1 + \Delta_s^2)} n_s e_i. \quad (2)$$

Параметрический расчёт стационарной выходной мощности на основе (2) в зависимости от уровня накачки, определяющего величину  $\kappa$ , показывает значимость резонансной фазовой нелинейности. На рисунке 1, а приведены результаты такой оценки – по мере увеличения фактора нелинейной рефракции  $\beta$  рост нормированной плотности излучения  $U_{r,s}$  с нарастанием  $\kappa$  снижается, выходя на насыщение. В отсутствие нелинейности этого типа функции  $U_{r,s}(\kappa)$  имеют вид тривиальных линейных зависимостей, «стартующих» от значения  $\kappa=1$  с наклоном, который определяется величиной нормированного инициирующего поля  $e_i$ .

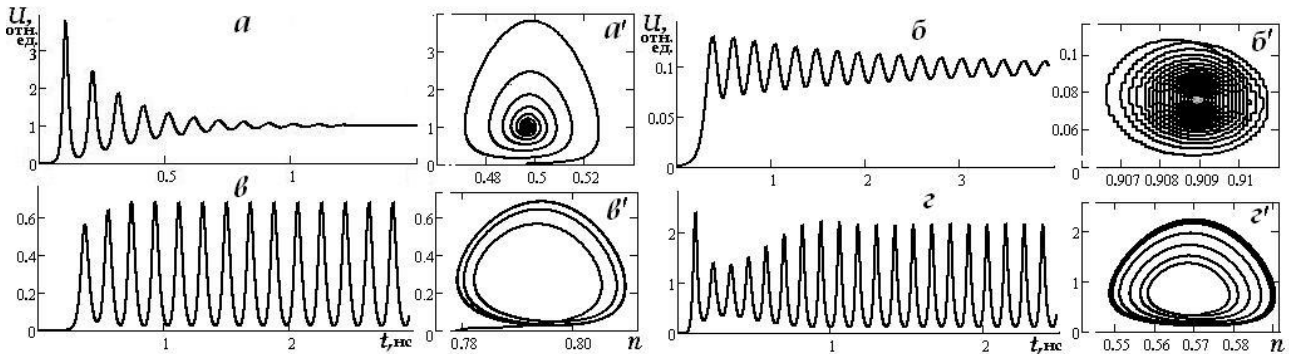
Формулировка условий динамической устойчивости или неустойчивости (2) может означать оценку возможности осцилляторного поведения излучаемого поля. С этой целью на основе линеаризации системы (1) в окрестности решений (2) сформулировано характеристическое уравнение третьей степени относительно величины  $\chi$  – коэффициента в показателе элементарных экспонент вида  $\exp(\chi t)$ . Этими экспонентами можно представить решения (1) в окрестности (2) с относительно малой амплитудой. Значения  $\chi$  могут быть комплексными, и этот случай с точки зрения проводимого поиска наиболее интересен, поскольку отвечает тому поведению кривых в фазовом пространстве системы (1), которое соответствует её осцилляторным решениям. Особыми с точки зрения корреляции динамического поведения модели (1) и возможной реальной временной развёртки выходного излучения представляются её неустойчивые решения, которые отвечают определённому диапазону значений её коэффициентов. В этой области характеристическое уравнение, формулируемое на основе лине-

аризованного аналога (1), может иметь два комплексных корня ( $\chi_2$  и  $\chi_3$ ). Незатухающие со временем на протяжении действия постоянной накачки периодические изменения нормированной плотности излучения  $U_r(t)$ , возможны при таких сочетаниях коэффициентов (1), при которых действительная часть корней  $\chi_{2,3}$  положительна. Рисунок 1, б иллюстрирует ход функций  $\text{Re } \chi_{2,3}(\kappa)$  для разного уровня фазовой нелинейности. Точки пересечения зависимостей  $\text{Re } \chi_{2,3}(\kappa)$  с горизонтальной осью характеризует так называемый второй порог генерации (по уровню накачки), начиная с которого в излучении развиваются автоколебания мощности.



$\beta = 0.02$  (кривые 1), 0.04 (2), 0.05 (3), 0.08 (4);  $\epsilon_i = 2.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\gamma = 1.58$ ,  $T_1 = 1 \cdot 10^{-9}$ с,  $T_2 = 1 \cdot 10^{-12}$ с  
Рисунок 1. – Зависимости стационарной плотности излучения (а) и действительной части (б) корней характеристического уравнения от параметра накачки  $\kappa$

На рисунке 2 представлены результаты моделирования (численного интегрирования (1)), которое проведено для значений коэффициентов (1), которые, судя, например, по данным работы [2], характерны параметрам ряда полупроводниковых структур с квантоворазмерными эффектами в спектральной области экситонного резонанса. Приведены развертки  $U_r(t)$  (фрагменты а - в) и фазовые портреты соответствующих решений (фрагменты а' - з').



$\kappa = 1.1$  (а, а'), 1.15 (б, б'), 1.18 (в, в'), 1.25 (з, з');  $\beta = 0.05$ ,  $\gamma = 1.58$ ,  $\epsilon_i = 2.5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\tau_{12} = 1 \cdot 10^3$   
Рисунок 2. – Зависимости нормированной плотности от времени (а - з) и форма фазовых кривых (а' - з'):

Параметры накачки на приведенных развертках решений (1) отвечают значениям  $\kappa$  для кривой 3 рисунка 1, б. Превышению второго порога генерации (рис. 2, в, з) соответствует равновесные состояния (2) с типом неустойчивого фокуса. В фазовом пространстве системы (1) тогда возникают предельные циклы (рис. 2, в', з'), решениями для плотности излучения  $U_r(t)$  описываются режимы с регулярной структурой в субнаносекундном диапазоне.

Список литературы

1. Quantum-dot supercrystals for future nanophotonics / A.S. Baimuratov [et al.] // Scientific Reports 3. – 2013. – N 1727. – P. 1-9.
2. 1.3- $\mu\text{m}$  submilliamp threshold quantum dot micro-lasers on Si / Y. Wan [et al.] // Optica. – 2017. – V.3, N8. – P. 940-944
3. Тимощенко, Е.В. Резонансная модель регулярных режимов излучения лазеров на полупроводниковых квантоворазмерных структурах / Е.В. Тимощенко, В.А. Юревич // 12 Бел. – Росс. Семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе»: сборник статей. Минск: ИФ им. Б.И. Степанова НАН Беларуси. – 2019. – С.137-140.

## **СЕКЦИЯ 4.**

# **ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**



## МАГНИТНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ НА ОСНОВЕ $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$

<sup>1</sup>Государственное объединение "Научно-практический центр национальной академии наук Беларуси по материаловедению", Минск, Беларусь.

<sup>2</sup>Технический университет Дрездена, Дрезден, Германия.

<sup>3</sup>Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь.

Перспективными материалами для применения в устройствах спинтроники при комнатной температуре на основе магнитных туннельных переходов являются тонкие пленки ферромолибдата стронция ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ , SFMO). Такие устройства являются альтернативой КМОП транзисторам при использовании в энергонезависимой памяти, компараторах, аналого-цифровых преобразователях и магнитных датчиках. Для успешного практического использования таких устройств необходимо решить, в частности, следующие задачи: 1) выбор соответствующего материала туннельного барьера; 2) увеличение значения магнитосопротивления в слабых магнитных полях тонких пленок SFMO. Показано, что 1) в устройствах с магнитными туннельными переходами на основе SFMO предпочтительно использование барьерных материалов с более низкой эффективной электроотрицательностью, чем у SFMO; 2) антифазные границы вдоль оси роста пленок увеличивают значение отрицательного слабополювого магнитосопротивления, так как в отсутствие магнитного поля уменьшается рассеяние носителей заряда.

### Введение

Ферромолибдат стронция ( $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ , SFMO) – двойной перовскит, ферромагнитный полуметалл с практически 100 % спиновой поляризацией, высоким значением температуры Кюри  $T_C = 415$  К, а также обладает слабополювым магнитосопротивлением (СПМС), что позволяет отнести этот материал к перспективным для применения в спинтронике.

Магнитный туннельный переход представляет собой два ферромагнитных или ферри-магнитных слоя, разделенных тонким диэлектрическим слоем – туннельным барьером. Направление намагниченности одного из магнитных слоев («закрепленного» слоя) зафиксировано в одном направлении, например, посредством обменного взаимодействия, в то время как направление намагниченности второго магнитного слоя («свободного» слоя) может быть изменено магнитным полем или путем подачи спин-поляризованного тока. В случае, если направления намагниченности обоих слоев параллельны, электроны туннелируют через барьерный слой, и устройство находится в состоянии с низким электросопротивлением. Если направления намагниченности этих слоев направлены антипараллельно, туннелирование практически не происходит (высокоомное состояние), когда спины электронов в одном из состояний (спин-вверх или спин-вниз) преобладают на уровне Ферми.

Таким образом, устройство можно переключать между высокоомным и низкоомным состояниями электросопротивления. Для практического применения подобных устройств следует максимально увеличивать разницу между сопротивлением в этих двух состояниях (иными словами, необходимо стремиться к получению максимальной величины магнитосопротивления в слабых магнитных полях).

### Выбор материала туннельного барьера

Если рассматривать идеальную границу проводник-диэлектрик (без учета поверхностных состояний), перенос заряда осуществляется между двумя слоями путем создания поверхностного диполя, который смещает относительное положение уровня Ферми проводника в соответствии с положениями валентной зоны и зоны проводимости диэлектрика. Величина этого диполя определяется способностью обоих слоев смещать к себе электроны, то есть электроотрицательностью. Шкала электроотрицательности Полинга  $X$  основывается на разнице между действительной и ожидаемой энтальпией создания связей в различных молекулах вида А-В. Для того, чтобы каждому химическому элементу присвоить значение относительной электроотрицательности, самому электроотрицательному элементу, фтору, было

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

присвоено значение  $X = 4.0$ . Чтобы определить относительную электроотрицательность сложного соединения, состоящего из  $N$  компонентов, используют среднее геометрическое значение электроотрицательности всех  $N$  компонентов [1]:

$$\langle X \rangle = \left( \prod_{i=1}^N X_i \right)^{1/N} \quad (1)$$

Выбор туннельного барьера для создания устройства с магнитным туннельным переходом представляет собой задачу первостепенной важности, так как процесс туннелирования зависит от свойств интерфейса электрод-барьер. Например, степень спиновой поляризации через интерфейс  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ , осажденного на различные барьерные материалы ( $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{LaAlO}_3$ ) зависит от материала барьера и сильно отличается от величины спиновой поляризации свободной поверхности [2].

Рассчитанные значения эффективной электроотрицательности материалов, которые могут быть использованы в качестве барьеров или электродов для создания устройств на основе магнитного туннельного перехода, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения эффективной электроотрицательности ферро- и ферримагнитных материалов

Соединение	Функция	$\langle X \rangle$
Fe	Электрод	1,83
NiFe	Электрод	1,87
Co	Электрод	1,88
MgO	Барьер	2,12
$\text{La}_2\text{O}_3$	Барьер	2,18
$\text{BaTiO}_3$	Барьер	2,24
$\text{SrTiO}_3$	Барьер	2,26
$\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$	Электрод	2,31
$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$	Электрод	2,31
$\text{LaAlO}_3$	Барьер	2,35
ZnO	Барьер	2,38
$\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$	Электрод	2,38
$\text{Mg}_3\text{B}_2\text{O}_6$	Барьер	2,40
$\text{SrMoO}_3$	Барьер	2,42
$\text{HfO}_2$	Барьер	2,49
$\text{Mn}_2\text{O}_3$	Барьер	2,50
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Барьер	2,54
$\text{SrMoO}_4$	Барьер	2,57
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Электрод	2,62
$\text{TiO}_2$	Барьер	2,63
$\text{MnO}_2$	Барьер	2,64
$\text{Ta}_2\text{O}_5$	Барьер	2,71

Смещение электронов к электроду SFMO связано с более высоким значением  $X$  у SFMO относительно величины  $X$  барьера, что может частично скомпенсировать ослабление магнетизма, возникающее из-за магнитного разупорядочения на интерфейсе. Обратное явление происходит, если величина эффективной электроотрицательности барьера выше, чем  $X$  SFMO. Соответственно, для увеличения значения туннельного магнитосопротивления устройства (иными словами, для увеличения разницы электросопротивления между высокоомным и низкоомным состояниями), следует выбирать материал туннельного барьера с меньшим, чем у SFMO, значением  $X$ .

Данные расчеты хорошо согласуются с практикой: значения туннельного магнитосопротивления  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ , осажденного на барьеры  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{TiO}_2$  с Co, используемым как второй электрод, составили 540 %, 301 % и 140 % соответственно [2].

Таким образом, подходящими материалами барьеров для создания устройств на основе магнитных туннельных переходов с SFMO в качестве электрода, являются  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ .

### Слабополевое магнитосопротивление.

Для уменьшения стоимости производства устройств на основе магнитных туннельных переходов, следует добиваться наибольшей разницы электросопротивления между высокоомным и низкоомным состояниями при одновременном уменьшении величины внешнего магнитного поля, необходимого для переключения устройства из одного состояния в другое. В 1998 году [3] было обнаружено, что зависимость магнитосопротивления SFMO можно разделить на две части: сильнополевое ( $B > 0,5$  Тл) и слабополевое магнитосопротивление (СПМС,  $B \sim 0,1$  Тл).

Установлено, что СПМС в SFMO наблюдается из-за спин-зависимого туннелирования электронов через границы зерен [4], что также подтверждается фактом, что в монокристаллах SFMO СПМС практически отсутствует [5]. Хотя наличие таких межзеренных границ зависит от условий осаждения тонких пленок, показано, что последующий отжиг пленки в атмосфере чистого Ag при температуре  $\sim 500$  °C на протяжении 5 ч создает эти границы, повышая, тем самым, значение СПМС.

Величина сопротивления тонких пленок SFMO, ориентированных (111) в 2-3 раза ниже, чем сопротивление пленок, ориентированных (100) [6], поэтому далее рассмотрим только пленки, ориентированные (111).

Тонкие пленки SFMO, осажденные методом импульсного лазерного напыления на подложки  $\text{SrTiO}_3$  (111) обладают более высоким СПМС, чем пленки, осажденные на  $\text{SrTiO}_3$  (001) [6]. Это явление, предположительно, объясняется присутствием антифазных доменных границ, которые формируются на неровностях (ступеньках) поверхности подложки.

Показано [6], что наличие такой ступеньки на поверхности подложки благоприятно сказывается на формировании октаэдров  $\text{FeO}_6$ – $\text{FeO}_6$  и отрицательно – на формировании октаэдров  $\text{FeO}_6$ – $\text{MoO}_6$ , иными словами, в таком случае и создаются антифазные границы, которые и повышают СПМС.

Электротранспорт через антифазные границы в тонких пленках SFMO (111) происходит только в присутствии внешнего магнитного поля, когда спины всех зерен направлены по полю [7]. Также показано, температурная зависимость электросопротивления таких пленок схожа с поведением сопротивления монокристаллов SFMO [5], которое описывается уравнением

$$\rho(T) = \rho_0 + R \cdot T^2, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – остаточное электросопротивление,  $R$  – коэффициент, зависящий от механизма рассеяния носителей заряда.

Температурную зависимость электросопротивления (111) пленок можно объяснить тем фактом, что антифазные границы в этом случае формируются по направлению роста пленки

SFMO, что приводит к удержанию носителей заряда в зернах SFMO, из-за чего увеличивается средняя длина их рассеяния. Следовательно, уменьшается значение  $\rho_0$ .

Однако, в случае приложения внешнего магнитного поля, антифазные границы становятся более прозрачными для носителей, соответственно, их средняя длина рассеяния уменьшается, что приводит к дополнительному вкладу в величину СПМС.

### Заключение

Для практического применения устройств спинтроники на основе магнитных туннельных переходов SFMO следует уделить особое внимание выбору материала туннельного барьера, в частности, следует выбирать материал с меньшей эффективной электроотрицательностью, чем у SFMO. Также показано, что для получения более качественных приборов следует использовать подложки с ориентацией (111), которые увеличивают значение магнитосопротивления перехода в слабых полях, приводя к большей разнице между электросопротивлением в высоко- и низкоомном режимах работы.

### Список литературы

1. Nethercot A. H. Prediction of Fermi energies and photoelectric thresholds based on electronegativity concepts // *Phys. Rev. Lett.* – 1974. – Vol. 33, No. 18. P. 1088–1091.
2. Garcia V., Bibes M., Barthélémy A., Bowen M., Jacquet E., Contour J.-P., Fert A. Temperature dependence of the interfacial spin polarization of  $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$  // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* – 2004. – Vol. 69, No. 5. P. 052403.
3. Kobayashi K.-I., Kimura T., Sawada H., Terakura K., Tokura Y. Room-temperature magnetoresistance in an oxide material with an ordered double-perovskite structure // *Nature* – 1998. – Vol. 395, No. 6703. P. 677–680.
4. Niebieskikwiat D., Caneiro A., Sánchez R. D., Fontcuberta J. Oxygen-induced grain boundary effects on magnetotransport properties of  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* – 2001. – Vol. 64, No. 18. P. 180406(R).
5. Tomioka Y., Okuda T., Okimoto Y., Kumai R., Kobayashi K.-I., Tokura Y. Magnetic and electronic properties of a single crystal of ordered double perovskite // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* – 2000. – Vol. 61, No. 1. P. 422–427.
6. Manako T., Izumi M., Konishi Y., Kobayashi K.-I. Epitaxial thin films of ordered double perovskite  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$  // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – Vol. 74, No. 15. P. 2215–2217.
7. Suchanek G., Artiukh E. Magnetoresistance of Antiphase Boundaries in  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  // *Phys. Status Solidi Basic Res.* – 2022. – Vol. 259, No. 8. P. 2100353.

## НАДЕЖНОСТЬ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

Представлен аналитический обзор по проблемам надежности и радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ), в том числе предназначенных для космического применения. Рассмотрены методы оценки и обеспечения надежности и радиационной стойкости полупроводниковых приборов (ПП) и интегральных схем (ИС).

Важнейшую роль в обеспечении длительной и безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в космических условиях играет стойкость её элементов к воздействию факторов космической среды: электрическое поле, температура, низкоинтенсивное ионизирующее излучение (ИИ) космического пространства (КП), протоны, электроны и тяжелые ионы. Радиационная стойкость – одна из важнейших характеристик надежности РЭА, которая определяет срок активного существования (САС) и вероятность безотказной работы (ВБР) космических объектов. Создание высокоэффективных надёжных структур радиационностойких изделий электроники является сложной задачей [1-3].

Надежность – одно из основных свойств РЭА, характеризующего способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения при сохранении во времени значений параметров в установленных пределах [4]. Надежность аппаратуры зависит от ее безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. При эксплуатации в условиях КП РЭА космического аппарата (КА) находится под воздействием большого количества внешних факторов. К числу наиболее опасных относится ИИ КП. Для оценки способности РЭА выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм в процессе и после воздействия ИИ применяются показатели радиационной стойкости.

Радиационные эффекты, обусловленные воздействием на КА потоков заряженных частиц высокой энергии, зависят от величины поглощенной дозы космической радиации и от мощности дозы. Существуют также эффекты, вызываемые воздействием одиночных заряженных частиц. С величиной полной поглощенной дозы связано постепенное ухудшение свойств материалов и характеристик оборудования КА. Мощность дозы оказывает влияние на процессы люминесценции материалов при облучении и возникновение в них радиационной проводимости. Обратимые и необратимые изменения свойств материалов происходят за счет всех радиационных эффектов, наблюдаемых в твердом теле: ионизационных эффектов, эффектов переноса заряда и эффектов смещения. Наиболее чувствительны к воздействию космической радиации полупроводниковые и оптические материалы, в меньшей степени – полимерные материалы, самую высокую стойкость к воздействию радиации имеют металлы [5].

К основным особенностям электронной компонентной базы (ЭКБ), применяемой в условиях КП, относятся: широкая функциональная номенклатура (порядка 1500 наименований); малая серийность (от 10–15 шт. до 100 тыс. шт. на протяжении всего жизненного цикла изделия); высокие требования к надежности (безотказность, ресурс, сохраняемость): интенсивность отказов  $\lambda = 10^{-9}$ – $10^{-10}$  для активных элементов и  $\lambda = 10^{-11}$ – $10^{-12}$  для пассивных при малосерийном производстве ЭКБ; стойкость к воздействию ИИ КП (не менее 50 крад), расширенный температурный диапазон (от -60 до 125°C); необходимость обеспечения длительных сроков безотказной работы (15 лет и более) [6].

Приведем лишь небольшую статистику по влиянию различных дестабилизирующих факторов на отказы аппаратуры ракетно-космической техники: 54,2% – электростатический

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

разряд; 28,4% – одиночные события; 5,4% – дозовый отказ; 12,0% – причина не установлена [6].

Применительно к современным КА наибольшие трудности в обеспечении длительных САС возникают со стороны электронных систем космических объектов [7]. Причины такого положения – в высоких темпах роста функциональной и аппаратной сложности электронных систем КА и недостаточной надежности ЭКБ. На рисунке 1 приведены данные о распределении причин отказов бортового оборудования КА.

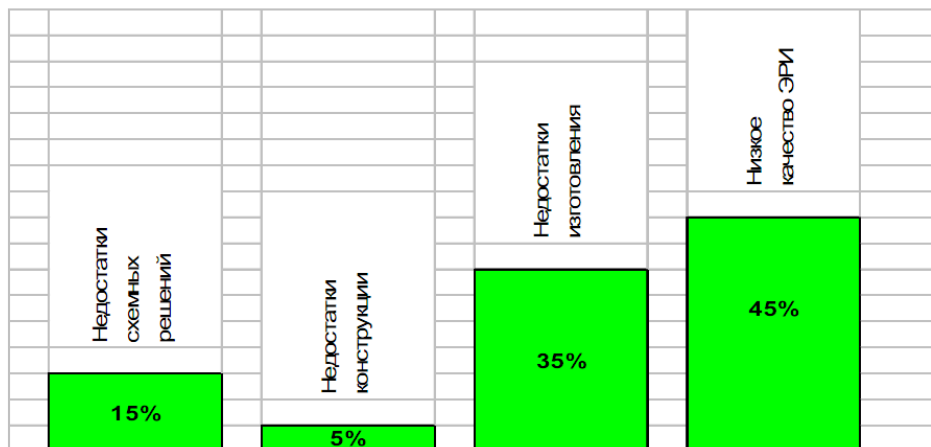


Рисунок 1 – Распределение причин неисправностей бортового оборудования КА

К основным радиационным эффектам в микроэлектронных изделиях относятся [1-3]: деградация электрических и функциональных характеристик ПП и ИС (в первую очередь, полупроводниковых и оптоэлектронных) вследствие накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрических структурах (поверхностные радиационные эффекты); деградация электрических характеристик ПП и ИС из-за образования радиационных дефектов внутри кристаллической структуры (объемные структурные повреждения); возникновение мощных импульсных электрических разрядов после электростатического пробоя изолирующих материалов; сбои и отказы от воздействия отдельных высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) (протоны с энергией выше 10–20 МэВ и ионы солнечных и галактических космических лучей).

В процессе производства гарантии надежности и радиационной стойкости микросхем обеспечиваются: аттестацией каждой партии пластин на соответствие радиационной стойкости, контролем всех динамических параметров, измерением параметров как в нормальных условиях, так и на крайних значениях температур, проведением электротермотермировок (ЭТТ). Для прогнозирования надежности применяются ускоренные испытания [8].

В работе [9] в качестве перспективного средства индивидуальной отбраковки потенциально ненадежной электронной компонентной базы предложен термодинамический подход на базе методов релаксационной спектроскопии глубоких центров в полупроводниках. Для транзисторов и ИС получены зависимости амплитуды релаксации емкости от частоты следования электрических импульсов заполнения глубоких уровней, обусловленных объемными и поверхностными дефектами различной природы.

В работе [10] испытания ИЭТ производства ОАО «Интеграл»: *n*-МОП/КНИ транзисторов (с *H*-запиткой) и *p*-МОП/КНИ транзисторов (с 2Т-запиткой и *H*-запиткой) показали, что они остаются работоспособными при облучении до дозы  $D = (1 \div 2) \cdot 10^6$  рад. В результате применения специальных конструкторско-технологических методов радиационная стойкость мощных *n*-канальных МОП транзисторов IFR830 повысилась на порядок (до  $D = 10^6$  рад).

Наиболее перспективным видом реализации сложных микроэлектронных устройств в условиях радиационного воздействия является «система в корпусе» (СвК). Высококачественные аналого-цифровые компоненты СвК рекомендуется создавать с помощью особого технологического маршрута изготовления биполярных и КМОП транзисторов [11].

Современные подходы к повышению надежности специализированных СБИС, стойких к ИИ, можно разделить на четыре большие группы (табл. 1) [6].

Таблица 1

Способы повышения надежности и радиационной стойкости СБИС

Название способов	Краткое содержание	Основные преимущества и недостатки
Технологические способы	Использование специализированных технологических процессов изготовления СБИС и специализированных материалов: «кремний на сапфире» (КНС), «кремний на изоляторе» (КНИ), гетероструктур и т.п.	Высокая цена, отсутствие необходимых материалов и оборудования
Схемотехнические способы	Использование библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, так называемых «усиленных» библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов	Возможность реализации на стандартных технологических процессах, относительная дешевизна. Стойкость к воздействию ТЗЧ
Конструктивные способы	Использование специальных корпусов, локальной защиты, покрытий и т.п.	Необходимость применения специализированных материалов для корпусов
Моделирование радиационных эффектов на этапе проектирования СБИС	Прогнозирование стойкости элементов СБИС и аппаратуры на этапе проектирования с использованием специализированных компонентов САПР и моделей компонентов	Необходимость разработки специализированных программных продуктов

Список литературы

1. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. - М.: Радио и связь, 2004. - 320 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ: Научное издание / Под ред. А. И. Чумакова. - М.: НИЯУ МИФИ, 2015. - 512 с.
3. Воздействие ионизирующего излучения в электронике: от схем памяти до формирователей изображений / под ред. М. Багатин, С. Жерардена. Перевод с англ. - М.: Техносфера, 2023. - 504 с.
4. Применение методов анализа надежности и риска при обеспечении, прогнозировании и оценке радиационной стойкости РЭА / К.Г. Сизова, П.К. Скоробогатов, М.О. Прыгунов // Безопасность информационных технологий. - 2018. -Т. 25, № 1. - С. 52-64.
5. Алексеев В.П., Ковалёв А.П. Факторы, определяющие надёжность и долговечность конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Новые исследования в разработке техники и технологий. - 2015, № 1. - С. 24-29.
6. Специализированные СБИС для космических применений: проблемы разработки и производства / А. Бумагин, Ю. Гулин, С. Заводсков и др. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2010, № 1. - С. 50-56.
7. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. - Томск: ТГУ, 2015. - 266 с.
8. Ерошкин А.Л., Попо Р. А. Оценка надежности полупроводниковых приборов и микросхем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015, № 12. - С. 221-225.
9. Крылов В. П., Богачев А. М. Релаксация глубоких центров в транзисторах и интегральных микросхемах // Известия вузов. Электроника. – 2020, 25(6). - С. 568-574.
10. Обеспечение радиационной стойкости различных видов МОП-приборов / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. - 2012. Вып. 1. С. 27-31.
11. Увеличение радиационной стойкости аналого-цифровых компонентов микроэлектронных систем // О. Дворников, В. Гришков, О. Громыко // Современная электроника. - 2010, № 5. - С. 54-61.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ-РЕКОМБИНАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В КРЕМНИИ

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»

Представлены результаты моделирования процессов переноса электронов в объемном кремнии многочастичным методом Монте-Карло с учетом захвата носителей заряда на ловушки при температуре кристаллической решетки 300 К. Процесс захвата электронов на ловушки включен как дополнительный механизм рассеяния в процедуру моделирования. Рассчитаны зависимости подвижности электронов для значений времени рекомбинации в диапазоне от  $2 \cdot 10^{-12}$  до  $10^{-10}$  с и времени генерации в диапазоне от  $2 \cdot 10^{-12}$  до  $10^{-9}$  с.

Метод Монте-Карло является мощным средством для моделирования процессов переноса носителей заряда в полупроводниках, полупроводниковых структурах и приборах на их основе [1–3]. Данный метод позволяет рассчитывать электрофизические параметры и электрические характеристики с учетом всех значимых процессов рассеяния носителей заряда. Для адекватного моделирования электрофизических свойств и электрических характеристик полупроводниковых приборных структур во многих случаях существенным является учет процессов генерации и рекомбинации носителей заряда, в частности, процесс генерации-рекомбинации носителей с учетом ловушек [4].

На сегодняшний день можно выделить два основных подхода к включению процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в алгоритм моделирования электрофизических свойств и электрических характеристик полупроводниковых приборных структур. Первый подход заключается в использовании процедуры генерации объемного заряда свободных носителей через заданную скорость генерации-рекомбинации, которая может быть непосредственно включена как в дрейфово-диффузионную модель переноса носителей заряда [4], так и в численную кинетическую модель переноса, реализуемую на основе многочастичного метода Монте-Карло [5]. Второй подход заключается во включении механизмов генерации-рекомбинации в качестве дополнительных процессов рассеяния носителей заряда в процедуру моделирования методом Монте-Карло [6].

Целью данной работы явилось включение процесса захвата электронов на ловушки и генерации с ловушек в процедуру моделирования переноса в объемном кремнии, и исследование влияния этого процесса на подвижность электронов в рамках моделирования многочастичным методом Монте-Карло.

Среднее время рекомбинации носителей заряда  $\tau_r$  и среднее время их генерации с ловушки  $\tau_g$  можно задать в виде следующих выражений [6]:

$$\frac{1}{\tau_r} = \nu s (N_t - n_t), \quad (1)$$

$$\frac{1}{\tau_g} = \nu_0 \exp\left(-\frac{eE_n}{k_B T}\right), \quad (2)$$

где  $\nu$  – тепловая скорость свободных электронов,  $s$  – сечение захвата на ловушку,  $N_t$  – концентрация ловушек,  $n_t$  – концентрация захваченных на ловушки электронов,  $\nu_0$  – частота колебаний,  $e$  – элементарный заряд,  $E_n$  – глубина залегания уровня энергии ловушки относительно дна зоны проводимости,  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура кристаллической решетки.

Алгоритм многочастичного метода Монте-Карло предполагает отслеживание во времени движения ансамбля частиц в пространстве импульсов и пространстве координат. Каждая такая частица является эквивалентом отдельного электрона. Для расчета подвижности моделирование является трехмерным в пространстве импульсов и координат, при этом фиксиру-



ется смещение каждой частицы вдоль направления электрического поля. В нашем случае использовался ансамбль из 10000 частиц. Подвижность рассчитывается как  $\mu = v_{dr}/E$ , где  $v_{dr}$  — дрейфовая скорость электронов,  $E$  — напряженность приложенного электрического поля. Дрейфовая скорость определяется как  $\bar{x}/t_M$ , где  $\bar{x}$  — среднее по ансамблю смещение электронов вдоль направления электрического поля за время моделирования  $t_M$ . В рамках рассматриваемой модели предполагается, что средние времена  $\tau_r$  и  $\tau_g$ , определяемые формулами (1) и (2), являются постоянными. Величина  $1/\tau_r$  есть интенсивность рассеяния электрона с захватом на ловушку. Данный процесс включается как дополнительный механизм наряду с другими основными процессами рассеяния электронов в кремнии. Для нелегированного кремния такими механизмами являются рассеяние на акустических и междолинных фононах.

В случае захвата электрона на ловушку разыгрывается время его нахождения на уровне ловушки  $t_t$  в соответствии с формулой  $t_t = -\tau_g \ln r$ , где  $r$  — случайное число, равномерно распределенное на интервале (0, 1). При этом полагается, что пока электрон находится на уровне ловушки, его скорость равна нулю, а его пространственные координаты не изменяются. При генерации электрона с уровня ловушки в зону проводимости его состояние разыгрывается исходя из равновесного максвелловского распределения по импульсам.

На рисунке 1 в качестве примера представлены рассчитанные зависимости подвижности электронов от напряженности приложенного электрического поля в нелегированном объемном кремнии при температуре 300 К и фиксированном параметре  $\tau_g = 2 \cdot 10^{-12}$  с.

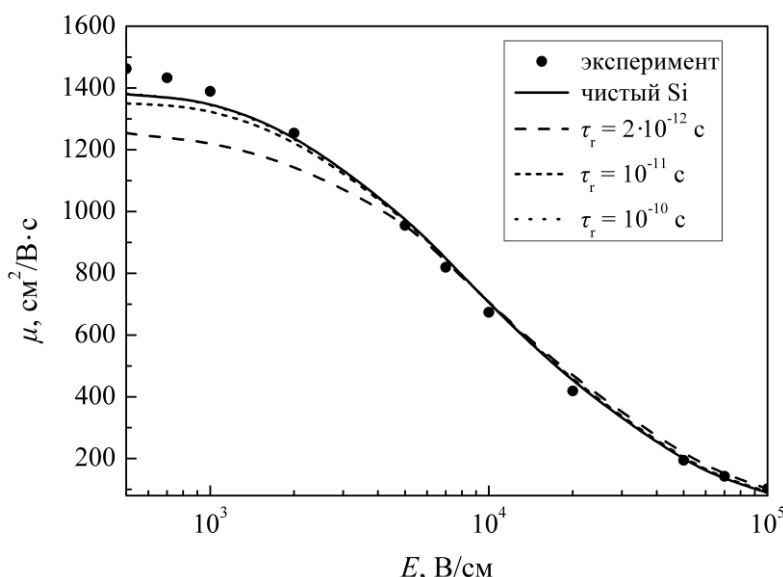


Рисунок 1 – Рассчитанные зависимости подвижности электронов в объемном кремнии от напряженности электрического поля при температуре 300 К для различных значений параметра  $\tau_r$ .

Для кривых на рисунке 1 время рекомбинации  $\tau_r$  составляет  $2 \cdot 10^{-12}$ ,  $10^{-11}$  и  $10^{-10}$  с [6]. Также на данном рисунке для сравнения приведена рассчитанная зависимость подвижности для чистого (без ловушек) кремния (сплошная кривая) и результаты интерполяции эксперимента из обзора [7].

На рисунке 2 представлены рассчитанные зависимости подвижности электронов для фиксированного времени  $\tau_r = 2 \cdot 10^{-12}$  с. Для кривых на рисунке 2 время генерации  $\tau_g$  составляет  $10^{-11}$  с,  $10^{-10}$  с и  $10^{-9}$  с [6].

Как видно из рисунка 1, процессы захвата электронов на ловушки при рассмотренных параметрах моделирования имеют более заметное влияние на подвижность при низких значениях напряженности электрического поля. Объяснить это можно тем, что использованная простая модель захвата электронов на ловушки предполагает постоянную интенсивность этого процесса, не зависящую от энергии электрона.

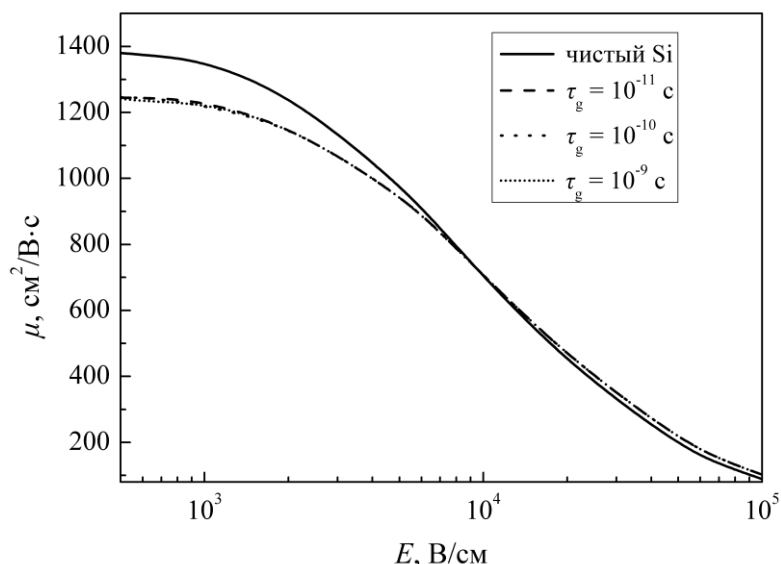


Рисунок 2 – Рассчитанные зависимости подвижности электронов в объемном кремнии от напряженности электрического поля при температуре 300 К для различных значений параметра  $\tau_g$ .

Таким образом, относительный вклад этого механизма существенен в слабом электрическом поле при относительно малых интенсивностях фононного рассеяния. С ростом же напряженности электрического поля доминирующими механизмами рассеяния, определяющими подвижность электронов, становятся фононные механизмы, а вклад процессов генерации-рекомбинации становится не столь существенным. Также можно заметить, что изменение параметра  $\tau$  в рассмотренном диапазоне его значений имеет большее влияние на подвижность, чем изменение параметра  $\tau_g$  при фиксированном  $\tau$  (см. рисунок 2).

#### Список литературы

1. Jacoboni, C. The Monte Carlo method for semiconductor device simulation / C. Jacoboni, P. Lugli. — Wien : Springer-Verlag. — 1989. — 357 p.
2. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов, О. Г. Жевняк, Ф. Ф. Комаров, В. О. Галенчик. — Минск : БГУ. — 2007. — 175 с.
3. Борздов, В. М. Разыгрывание полярного угла рассеяния электронов на ионах примеси при моделировании процессов переноса заряда в полупроводниках методом Монте-Карло // ФТП. — 2023. — Т. 57, вып. 1. — С. 14–20.
4. Hurkx, G.A.M. A new analytical diode model including tunneling and avalanche breakdown / G.A.M. Hurkx et al. // IEEE Trans. Electron Devices. — 1992. — Vol. 39, No. 9. — P. 2090–2098.
5. Jiao, Y. Comparison of band-to-band tunneling models in Si and Si-Ge junctions / Y. Jiao [et al.] // Journal of Semiconductors. — 2013. — Vol. 34, No. 9. — P. 092002-1–092002-5.
6. Perez, S. Microscopic analysis of generation-recombination noise in semiconductors under dc and time-varying electric fields / S. Perez, T Gonzalez, S.L. Delage, J. Obregon // J. Appl. Phys. — 2000. — Vol. 88, No. 2. — P. 800–807.
7. Jacoboni, C. A review of some charge transport properties of silicon / C. Jacoboni, C. Canali, G. Ottaviani, A. Alberigi Quaranta // Solid-State Electron. — 1977. — Vol. 20. — P. 77–89.

## МАГНЕТРОННО-ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Представлен краткий анализ применения комбинированной магнетронно-лазерной технологии для формирования пленочных покрытий на основе углерода, износостойких, светопоглощающих, биосовместимых и смазочных покрытий. Рассматривается методика формирования покрытий типа наночастицы Ag в Ti диэлектрической матрице. Представлены результаты авторских работ по нанесению таких покрытий магнетронно-лазерной технологией. Обсуждаются особенности образования комбинированного потока, структура и оптические характеристики покрытий.

### МАГНЕТРОННО-ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ФОРМИРОВАНИИ ПОКРЫТИЙ

Комбинация лазерной и магнетронной плазмы позволяет получать покрытия с уникальными свойствами по причине гибкости параметров каждой из составляющей комбинированного потока. Количество известных исследований по применению такой технологии (PLDMS) для осаждения пленочных покрытий немногочисленно. Основное внимание исследователей было обращено на создание твердых, прочных, устойчивых к механическому воздействию и термостабильных пленочных покрытий на основе углерода. Используя излучение эксимерного лазера KrF (248 нм) в атмосфере аргона, водорода и смеси аргона с азотом, синтезированы нанокристаллические карбид титана и кремния (TiC, TiC/аморфный C, SiC) [1-6], карбонитрид титана (TiCN), осаждаемый при абляции керамической мишени TiC [2, 3, 7], алмазоподобный углерод (DLC) [5, 8]. Получены покрытия TiC с высокой твердостью, с низким коэффициентом трения и высокой прочностью. Покрытия SiC синтезированы при комнатной температуре, сформированы композитные слои с непрерывно изменяющимися по толщине профилями концентрации титана и углерода [4]. Получены как однослойные пленки, так и многослойные структуры DLC/TiC/Ti [5, 8]. Это привело к значительному снижению внутренних напряжений покрытий.

Эффективность использования магнетронно-лазерной технологии была продемонстрирована при получении покрытий, выполняющих функцию твердых смазочных материалов. Примером является осаждение композитного покрытия путем лазерной абляции керамики TiC и магнетронного распыления Ag [9]. С аналогичной целью комбинированный метод был применен для формирования структуры, образованной лазерной абляцией керамики YSZ (керамика ZrO<sub>2</sub> стабилизированная окислом иттрия Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и магнетронным распылением Ag или Mo [10, 11]. Полученные структуры характеризовались как износостойкостью, так и низким коэффициентом трения, высокой прочностью, что делает их привлекательными для аэрокосмических целей. Значительно улучшить свойства TiO<sub>2</sub> и Bi позволила технология PLDMS, когда керамическая мишень распылялась магнетроном и одновременно облучалась лазером [12].

Возможность получения легированных биосовместимых материалов была показана при создании покрытий DLC, легированных Cr и Ti путем лазерной абляции графита и магнетронного распыления металла [13, 14]. Светопоглощающие покрытия TiO<sub>2</sub>, допированные Bi и Pt, осаждались при распылении керамики TiO<sub>2</sub> и лазерной абляции Bi и Pt [15]. Потенциальное применение таких покрытий — это фотокатализаторы в видимой области солнечного спектра, полученные за счет уменьшения показателя преломления и ширины запрещенной зоны.

В указанных выше работах формирование покрытий в большинстве случаев проводилось при следующих методических условиях: эксимерный лазер KrF (248 нм) с

частотой импульсов 2-20 Гц, плотность мощности излучения на мишени  $2 \cdot 10^8$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, мощность магнетронного разряда 50-200 Вт при диаметре катода 5-7 см, давление рабочих газов 0,2-2 Па.

#### МАГНЕТРОННО-ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЧАСТИЦАМИ

В ряду различных пленочных покрытий можно выделить тип покрытий, представляющих собой массив наноразмерных частиц в твердотельной матрице иной химической природы. В частности, это нанокристаллы кремния и германия в оксидной матрице SiO<sub>2</sub> или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [16]. Большой интерес представляют наноструктуры для эффективного поглощения света на основе благородных металлов из-за появления в них резонансного поглощения. [17-20].

Результаты применения технологии PLDMS для формирования такого типа структур представлены в [21-23], где наночастицы Ti и Ag генерировались лазерной эрозией, а матрица TiO<sub>2</sub> формировалась магнетронным распылением. Для формирования потока металлических частиц использован двухимпульсный частотный лазер на АИГ:Nd<sup>3+</sup> с длиной волны 532 нм, длительностью импульсов 12 нс и задержкой между сдвоенными импульсами 0,4 мкс, при которой обеспечивалась максимальное содержание ионов в лазерной плазме. Относительное расположение подложки, магнетрона, лазерной мишени, а также параметры лазерного излучения, магнетронного разряда и давление газа отмечены в [23]. Отличительной методической особенностью формирования рассматриваемого типа покрытий является то, что оксидная матрица TiO<sub>2</sub> осаждалась не путем лазерной эрозии керамической мишени, а путем магнетронного распыления Ti в смеси Ag и O<sub>2</sub>. Причем состав смеси поддерживался на постоянном заданном уровне с помощью оптической системы, датчиком которой служил малогабаритный спектрометр.

При формировании комбинированного плазменного потока обнаружен ряд закономерностей, связанных с влиянием лазерной плазмы на характеристики магнетронного разряда. Возникновение лазерной плазмы сопровождается резким спадом напряжения горения и ростом тока магнетронного разряда до величин, характерных для дуговых разрядов. Длительность дугового разряда 5–30 мкс. Поскольку катодное пятно импульсного дугового разряда привязано к поверхности распыляемого материала оно может являться дополнительным источником мелкодисперсной капельной фазы в осаждаемой пленке. Подтверждением такого факта служат результаты рентгеноспектрального анализа элементного состава участков поверхности структуры, нанесенной на кремниевую подложку [23]. Кроме частиц Ag, регистрируемых на фоне титана и кислорода, которые формировались при магнетронном осаждении TiO<sub>2</sub>, обнаружены частицы размером около 1 мкм, принадлежащие Ti.

Оптические и структурные свойства оксидных покрытий с частицами Ti и Ag изучались методами оптической, сканирующей электронной микроскопии, спектрофотометрии и атомной силовой микроскопии. Преобладающий размер частиц Ag лежит интервале 20-60 нм с поверхностной плотностью 90-150 на 1 мкм<sup>2</sup>. Эти результаты значительно отличаются от структур с частицами титана, для которых размер составляет 50–150 нм с поверхностной плотностью 10-15 на 1 мкм<sup>2</sup>. Толщины пленок близки и составляют 200-250 нм.

Основной особенностью структур, содержащих частицы Ag в TiO<sub>2</sub>, является наличие четко выраженной полосы поглощения, обусловленной ППР. Обнаружено, что нанесение на поверхность структуры тонкого слоя TiO<sub>2</sub> толщиной 10 нм с целью антикоррозионной защиты увеличивает поглощение полосы ППР примерно на 5%. На оптические характеристики ППР влияет частота лазерных импульсов, которая определяет плотность металлических частиц в оксидной матрице. Спектры поглощения и пропускания структур Ag в TiO<sub>2</sub> с защитным слоем TiO<sub>2</sub> при частотах лазерных импульсов 1, 2 и 4 Гц показали что величина максимума поглощения растет с 72% до 97,5% с ростом частоты импульсов.

Полученное максимальное поглощение ППР превышает эту величину для структур, состоящих из наночастиц Ag в матрице из оксида кремния и поливинила [17, 19, 20]. Наблюдаемый сдвиг длины волны максимума поглощения от 450 до 400 нм с ростом частоты импульсов, вероятнее всего, связан с изменением характерного размера наночастиц серебра. Используя теоретические оценки [24], установлено, что размер частиц Ag лежит в интервале от 65 до 30 нм с ростом частоты лазерных импульсов от 1 до 4 Гц. Это хорошо согласуется с результатами обработки изображений, полученными с помощью атомной силовой микроскопии. Частота лазерных импульсов существенно влияет на величину и ширину полосы пропускания. Минимум пропускания снижается от 13 % до 0,2–0,3 % с ростом частоты лазерных импульсов. Для частоты 4 Гц оптическая плотность в диапазоне 420–520 нм составляет 2,6–2,7, что превышает указанные в [17, 19, 20] данные.

Представленные результаты свидетельствуют об эффективности комбинированной магнетронно-лазерной технологии для получения широкого класса пленочных структур, в частности, структур типа наночастицы Ag в матрице TiO<sub>2</sub> с высоким поглощением, вызванным поверхностным плазмонным резонансом.

#### Список литературы

1. Voevodin, A.A. Nanocrystalline carbide/amorphous carbon composites / A.A. Voevodin, S.V. Prasad, J.S. Zabinski // *J. Appl. Phys.* – 1997. – 82 (2) – P. 855–858.
2. Jelinek, M. Hybrid laser-magnetron technology for carbon composite coating / M. Jelinek, T. Kocourek, Ja. Kadlec, J. Zemek // *Laser Physics* – 2009. – 19(2) – P. 149–153.
3. Voevodin, A.A. Combined magnetron sputtering and pulsed laser deposition of carbides and diamond-like carbon films / A.A. Voevodin, M.A. Capano, A.J. Safriet, M.S. Donley // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – 69(2) – P. 188–190.
4. Jelinek, M. KrF laser deposition combined with magnetron sputtering to grow titanium-carbide layers / M. Jelinek, T. Kocourek, J. Kadlec, V. Vorlíčka, M. Čerňanska, V. Studnička, A. Santonic, P. Boháča, F. Uherek // *Thin Solid Films* – 2006. – 506 – P. 101–105.
5. Bulíř, J. Plasma study and deposition of DLC/TiC/Ti multilayer structures using technique combining pulsed laser deposition and magnetron sputtering / J. Bulíř, M. Novotn, M. Jelinek, T. Kocourek // *Surf. Coat. Tech.* – 2005. – 200 – P. 708–711.
6. Jelinek, M. Thin SiC<sub>x</sub> layers prepared by hybrid laser-magnetron deposition / M. Jelinek, T. Kocourek, J. Zemek, M. Novotn, J. Kadlec, // *Appl. Phys. A.* – 2008, – 93(3) – P. 633–637.
7. Kocourek, T. Thin TiCN films prepared by hybrid magnetron-laser deposition / T. Kocourek // *Plasma Process. Polym.* -2007.- Vol. 4.- P.651-654.
8. Voevodin, A.A. Pulsed laser deposition of diamond-like carbon wear protective coatings: a review / A.A. Voevodin, M.S. Donley, J.S. Zabinski // *Surf. Coat. Tech.* -1997.- Vol. 92. -P. 42–49.
9. Endrino, J.L. Microstructure and vacuum tribology of TiC–Ag composite coatings deposited by magnetron sputtering-pulsed laser deposition / J.L. Endrino, J.J. Nainaparampil, J.E.Krzanowski // *Surf. Coat. Tech.* -2002. -Vol. -157. -P. 95–101.
10. Muratore, C. Growth and characterization of nanocomposite yttria-stabilized zirconia with Ag and Mo / C. Muratore // *Surf. Coat. Tech.* -2005. -Vol. 200. -P. 1549–1554.
11. Jones, J.G. Plasma diagnostics of hybrid magnetron sputtering and pulsed laser deposition / J.G. Jones // *Surf. Coat. Tech.* -2006. -Vol. 201. P. -4040–4045.
12. Benetti, D. Combined magnetron sputtering and pulsed laser deposition of TiO<sub>2</sub> and BFCO thin films / D. Benetti // *Sci. Rep.* - 2017. -Vol. 7:2503 (9 p.).
13. Jelinek, M. Bonding and bio-properties of hybrid laser/magnetron Cr-enriched DLC layers / M. Jelinek // *Mat. Sci. Eng. C – Mater.* -2016. -Vol. 58. -P. 1217–1224.
14. Jelinek, M. Doped and multilayer biocompatible materials prepared by hybrid laser deposition / M. Jelinek // *Int. J. Biosci. Biochem. Bioinform.* -2018. -Vol. 8. -P. 252–258.
15. Escobar, L. Thin films prepared by a hybrid deposition configuration combining two laser ablation plasmas with one sputtering plasma / L. Escobar // *Appl. Phys. A.* -2019. -Vol. 126: 57 (8 p.).

*Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния*

16. Горшков, О.Н. Тетельбаум Д.И., Михайлов А.Н. Наноразмерные частицы кремния и германия в оксидных диэлектриках. Формирование, свойства, применение. / Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. -2006. 83 с.
17. Гончаров, В.К. Формирование и комплексная диагностика спектрально-морфологических параметров наноразмерной фазы серебра в полимерной пленке / В.К. Гончаров, К.В. Козадаев, Д.И. Шиман // Журнал прикладной спектроскопии. -2010. -Т. 77, - № 5. -С. 732–736.
18. Baraldi, G. Application of PLD to the production of plasmonic structures containing Ag nanoparticles based on chalcopyrite solar cells / G. Baraldi // Energy Procedia. -2011. -Vol. 10. -P. 38–42.
19. Потапов, А.Л. Морфология серебряных наночастиц, сформированных в поливинилспиртовой пленке / А.Л. Потапов, Н.А. Иванов, В.Е. Агабеков // Полимерные материалы и технологии. -2016. -Т. -2, -№3. -P. 24–29.
20. Попок, В.Н. Синтез наночастиц серебра в стеклах методом ионной имплантации и исследование их оптических свойств / В.Н. Попок, А.Л. Степанов, В.Б. Оджаев // Журнал прикладной спектроскопии. -2005. -Т. 72, -№ 2. -С. 218–223.
21. Бурмаков, А.П. Комбинированное магнетронно-лазерное осаждение диэлектрических покрытий, содержащих металлические частицы / А.П. Бурмаков, О.Р. Людчик, В.Н. Кулешов // Вестн. БГУ. Сер. 1. -2016. -№ 2. -С. 41–48.
22. Бурмаков, А.П. Особенности формирования комбинированной магнетронно-лазерной плазмы в процессах нанесения пленочных покрытий / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов, К.Ю. Прокопчик // ИФЖ. -2016. -Т. 89 -№ 5. -С. 1281–1287.
23. Бурмаков, А.П. Комбинированное магнетронно-лазерное осаждение пленочных плазмонных структур оксида титана с наночастицами серебра / Бурмаков А.П., Кулешов В.Н., Столяров А.В. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. -2020. -Т. 1. -С. 54–59.
24. Крутяков, Ю.А Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы / Ю.А Крутяков, А.А. Кудринский, А.Ю. Оленин // Успехи химии. -2008. -Т. 77, -№ 3. -С. 242–265.

УДК 621.315.592

Бускис К. П.<sup>1</sup>, Кобыляцкий А. В.<sup>1</sup>, Ящук В. А.<sup>2</sup>, Гременок В. Ф.<sup>1,2</sup>

## ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ S/Se НА МИКРОСТРУКТУРУ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$ , ПОЛУЧЕННЫХ ОТЖИГОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ

<sup>1</sup>Государственное научно-производственное объединение “Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению”, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники Минск, Республика Беларусь

Тонкие пленки  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$  (CTSSe) были синтезированы в процессе термического отжига в сера/селен атмосфере при 500 °С металлических слоев Sn/Cu (прекурсоров), полученных на стеклянных подложках методом радиочастотного магнетронного распыления. Исследованы структурные, морфологические и оптические свойства в широком диапазоне составов ( $0.0 \leq X \leq 1.0$ ). Энергодисперсионное рентгеновское измерение показало, что соотношение серы и селена в тонких пленках можно регулировать путем термического отжига. Поверхность всех образцов выглядит шероховатой, компактной и плотной, без явных проколов. Рентгеновские дифрактограммы показывают, что постоянная решетки линейно уменьшается с увеличением содержания серы. Анализ спектров комбинационного рассеяния подтверждает формирование пленок  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$  кубической структуры без вторичных фаз.

Полупроводниковые материалы  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$  (CTSSe) в настоящее время интенсивно исследуются в качестве альтернативы используемых в тонкопленочных солнечных элементах (ТСЭ) поглощающих слоев света CdTe и Cu (In, Ga)(S,Se) [1,2]. Они состоят из дешёвых и экологически чистых элементов. Запас меди (Cu), олова (Sn) и серы, селена (S,Se) в земной коре составляет 60 ч/млн, 2.3 ч/млн, 350 ч/млн и 0.05 ч/млн соответственно, по сравнению с 0.25 ч/млн (In), 19 ч/млн (Ga) и 0.001 ч/млн (Te) [3]. Теоретически показано, что однопереходный ТСЭ на основе  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  обладает коэффициентом полезного действия (КПД) более 30.2% [4]. В настоящее время коэффициент полезного действия (эффективность) солнечных элементов на основе этих материалов достиг величины 6,7% [2]. Количество публикаций по  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}, \text{Se})_3$  и количество научных групп, применяющих различные методики для создания и исследования тонких слоев этих материалов, увеличивается ежегодно. Однако изучение фундаментальных свойств данных материалов остается на недостаточном уровне, что сдерживает дальнейшее увеличение эффективности изготовленных на их основе фотопреобразователей.

Цель данной работы состояла в исследовании микроструктурных характеристик тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$ , полученных осаждением металлических слоев Sn-Cu методом магнетронного распыления, с последующим термическим отжигом в парах серы/селена для выбора оптимальных условий формирования однофазного материала, пригодного для создания солнечных элементов.

Формирование тонких пленок CTSSe осуществлялось методом отжига в атмосфере S/Se прекурсоров Sn-Cu, полученных методом радиочастотного магнетронного распыления на химически очищенные стеклянные и стекло/Мо подложки. Осаждение металлов проводилось в последовательности Sn-Cu в атмосфере Ar при рабочем давлении 0.015 Торр и температуре подложки 25 °С. Термический отжиг слоев Sn-Cu толщиной 730 – 740 нм осуществлялся путем диффузии элементарной серы/селена из твердотельного источника в проточной атмосфере аргона. Процесс проводился при 500 °С в течение 30 мин. После завершения отжига постепенное остывание диффузионной печи происходило естественным путем.

Структурные характеристики и фазовый состав пленок CTS анализировали на рентгеновском дифрактометре Ultima IV с монохроматическим Cu K $\alpha$ -излучением ( $\lambda = 0.15406$  нм) в диапазоне от 10° до 70°. Определение фазового состава пленок осуществлялось путем сопоставления экспериментальных данных со стандартными, опубликованными в базе данных Joint Committee Powder Diffraction Standard (JCPDS). Морфология поверхности и химический состав пленок исследовали с помощью сканирующей электронной мик-

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

роскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМ) на растровом электронном микроскопе серии ZEISSEVO. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) регистрировались на конфокальном микроспектрометре inVia (Renishaw) в диапазоне 100 - 450 см<sup>-1</sup>. В качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 0.20 мВт. Рамановские частоты калибровали по кремниевому стандарту. Время интегрирования составляло 30 с.

При исследовании фазового состава прекурсоров Sn-Cu, полученных на различных подложках установлено, что они сформированы из гомогенной смеси фаз Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> и Cu<sub>3</sub>Sn. На рентгенограммах пленок проявляются рефлексы от плоскостей (221) при 30.13°, (113) при 30.20°, (132) при 43.10°, (204) при 43.12° и (422) при 43.38°, принадлежащие соединению Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> (JCPDC # 00-045-1488). Однако, наблюдаемый рефлекс при 43.38° может быть отражением от плоскости (100) соединения Cu<sub>3</sub>Sn (JCPDC # 00-001-1240). Учитывая данные элементного состава Cu : Sn = 65.5 ат.% : 35.5 ат.%, можно утверждать, что доминирующей фазой в сформированном материале является соединение Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>. Четкая идентификация фаз осажденного материала является затруднительной в связи с перекрытием углов отражения этих соединений и требует дополнительных исследований, в частности методом комбинационного рассеяния. При исследовании морфологии поверхности прекурсоров установлено, что все покрытия сформированы кристаллитами с одинаковым направлением роста, перпендикулярном подложке, и степенью шероховатости ±55 нм.

Элементный состав пленок Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>x</sub>,Se<sub>1-x</sub>)<sub>3</sub> рассчитывал по 5 точкам на различных участках поверхности с учетом химического состава стеклянной подложки. Типичный элементный состав слоев с различным содержанием серы и селена приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав полученных пленок Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>x</sub>,Se<sub>1-x</sub>)<sub>3</sub>

Пленка	Cu, at. %	Sn, at. %	Se, at. %	S, at. %	Cu/Sn	X = S/(Se+S)
X = 0.00	34.58	15.98	49.43	-	2.16	0.00
X = 0.30	33.15	15.61	35.70	15.54	2.12	0.30
X = 0.58	33.88	16.47	20.65	29.00	2.06	0.58
X = 0.85	34.07	17.10	7.79	41.06	1.99	0.84
X = 1.00	36.07	18.64	-	45.29	1.94	1.00

С помощью СЭМ проанализирована морфология поверхности и микроскопия поперечного сечения тонких пленок CTSSe с различным соотношением S/(S + Se). Поверхность всех пленок выглядит компактной и плотной, без явных проколов, но образцы имеют шероховатую поверхность. Вероятно, это связано с неоднородным ростом зерен при использовании порошка в качестве источника халькогена при термическом отжиге металлических прекурсоров Sn-Cu. Фотографии поперечного сечения пленок показывают, что средняя толщина составляет ≈ 1.1-1.4 мкм.

На рисунке 1 представлены рентгенограммы тонких пленок Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>)<sub>3</sub> с различным соотношением S/(S + Se), выявляющие их поликристаллическую природу. Для всех образцов очевидно наличие трех доминирующих пиков (111), (220) и (311). Для пленок с X = 0.0 (CTSe) и X = 1.0 (CTS) результаты хорошо согласуются с базой данных JCPDS для кристаллов Cu<sub>2</sub>SnSe<sub>3</sub> (JCPDS #89-2879) и Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> (JCPDS #89-2877), соответственно. Согласно детальному анализу дифрактограмм наблюдаемые рефлексы могут быть отнесены к соединениям с кубической структурой. Дифракционные пики смещаются в сторону большего угла с увеличением содержания серы. Поскольку ионный радиус серы (1.02 Å) меньше, чем у селена (1,17 Å) [5], замена атомов Se на S приводит к сжатию кристаллической ячейки. Постоянная кристаллической решетки пленок, рассчитанная по рентгенограммам, линейно уменьшается с увеличением атомного содержания серы, что подчиняется закону Vegарда [6].



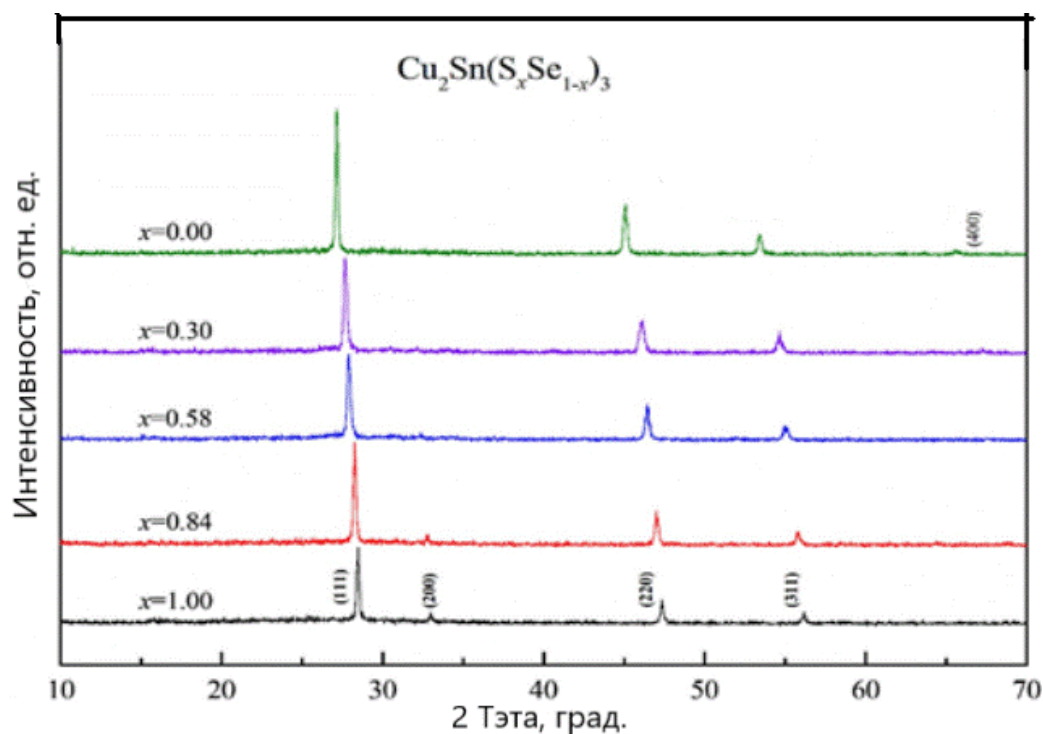


Рисунок 1 – Типичные рентгенограммы пленок  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$  в зависимости от состава

Установлено, что постоянная решетки (т.е.  $a$ ) пленок CTSe и CTS, рассчитанная с помощью программного обеспечения, составляет 5.683 и 5.426 Å, соответственно, это немного меньше, чем значения ( $a = 5.690$  Å и  $a = 5.430$  Å) из карт JCPDS. Вероятно, это указывает на то, что в тонких пленках CTSSe существует небольшое напряжение сжатия.

В спектрах комбинационного рассеяния света тонких пленок  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$  в диапазоне 175-210  $\text{cm}^{-1}$  и 325-350  $\text{cm}^{-1}$  наблюдаются два доминирующих пика. Эти пики, которые указывают на бимодальное поведение в образцах  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_3$ , смещаются в коротковолновую область спектра с увеличением содержания серы. В спектрах КРС вторичные фазы не обнаружены. Это указывает на то, что образуются соединения  $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S,Se})_3$  в чистой фазе. С другой стороны, в спектрах не проявляются колебания иных фаз, поддающихся однозначной идентификации, что согласуется с исследованиями кристаллической структуры полученных пленок методом рентгеновского фазового анализа.

**Благодарность:** Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ (белорусско-армянский проект № T21APM-003).

#### Список литературы

1. Giraldo S., Jehl Z., Placidi M., Izquierdo-Roca V., Pérez-Rodríguez A., Saucedo E. Progress and perspectives of thin film kesterite photovoltaic technology: a critical review // *Adv. Mater.* – 2019. – Vol. 31, No. 18. – P. 1806692.
2. Reddy V. R. M., Pallavolu M. R., Guddeti P. R., Gedi S., Reddy K. K. Y. B., Pejjai B., Kim W. K., Kotte T. R. R., Park C. Review on  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$ ,  $\text{Cu}_3\text{SnS}_4$ , and  $\text{Cu}_4\text{SnS}_4$  thin films and their photovoltaic performance // *J. Ind. Eng. Chem.* – 2019. – Vol. 76. – P. 39-74.
3. Содержание элементов в земной коре. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Содержание\\_элементов\\_в\\_земной\\_коре](https://ru.wikipedia.org/wiki/Содержание_элементов_в_земной_коре) (дата обращения 06.03. 2023).
4. Avellaneda D., Nair M. T. S., Nair P. K.  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  and  $\text{Cu}_4\text{SnS}_4$  Thin Films via Chemical Deposition for Photovoltaic Application // *J. Electrochem. Soc.* – 2010. – Vol. 157, No. 6. – P. D346-D352.
5. Miessler G. L., Tarr D. A. *Inorganic Chemistry*. – Prentice Hall, New Jersey, 2003. – 720p.
6. Vegard L. Die Konstitution der Mischkristalle und die Raumbfüllung der Atome // *Z. Physik.* – 1921. – Vol. 5. – P. 17–26.

УДК 678.057.9

Васильева В. С., Выдумчик С. В., Гавриленко О. О., Горохов С. Л.,  
Павлюкевич Т. Г., Понарядов В. В., Ксенофонов М. А.

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ ИЗ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫХ СИСТЕМ

Научно-исследовательское учреждение “Институт прикладных физических проблем имени  
А. Н. Севченко” Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

В работе представлено разработанное на базе новых конструкторских и инженерных решений с использованием микропроцессорной техники и специальных информационно-аналитических и логических программ автоматизированное оборудование для подготовки, смешения, высокоточного дозирования и производства из двухкомпонентных пенополиуретановых систем теплоизолирующего слоя, входящего в многослойную конструкцию предизолированных труб. Трубы изготавливаются в течение непрерывного технологического процесса, благодаря чему каждый из слоев имеет прочное физическое сцепление с соседними слоями, а устойчивость к пагубному воздействию различных химреактивов и агрессивной среды обеспечивает увеличение сферы применения таких конструкций.

Качественные комплектующие в сочетании с предизолированными трубами – гарантия длительной эксплуатации теплосетей в любой климатической зоне. Гибкие предизолированные трубы представляют собой многослойную конструкцию с применением теплоизоляции из вспененного полиуретана. Компоненты пенополиуретана смешиваются на заливочно-смесительной установке низкого давления, обеспечивающей наивысшее качество теплоизоляционного материала. Таким образом, достигается высокая степень однородности плотности пены и снижение коэффициента теплопроводности. Сама технология выпуска этой продукции и квалифицированный монтаж с соблюдением технологии обеспечивает безупречную работу теплосети на долгий срок без потребности в ремонте.

Разработанное нами оборудование характеризуется модульной конструкцией узлов. Благодаря данной особенности машина конфигурируется в индивидуальном порядке, в строгом соответствии с производственными задачами конкретного предприятия. На рисунке 1 представлен общий вид автоматизированного оборудования.



Рисунок 1 – Автоматизированное оборудование для непрерывного производства предизолированных труб из пенополиуретановых систем

#### *Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния*

В основу работы установки положен принцип непрерывной подачи дозированного количества двух жидких компонентов (полиэфиров и изоцианатов) в смесительную головку с динамическим перемешиванием. Процесс смешения компонентов осуществляется в проточной малогабаритной смесительной камере за счет механической энергии, благодаря высокой скорости вращения смесительного элемента (ротора).

В состав автоматизированного оборудования входят следующие основные функциональные узлы: емкости для компонентов и очистителя, дозирующие узлы компонентов, поворотная стойка с закрепленным на ней смесительным устройством, системы управления (для управления работой установки во всем диапазоне функциональных режимов), термостатирования (для подогрева и поддержания заданной температуры компонентов, находящихся в рабочих емкостях), очистки смесительной камеры (обеспечивает автоматическое удаление жидких остатков смеси из смесительной камеры после выполнения заливок) и автоматической дозаправки компонентов (обеспечивает подкачку компонентов из транспортной тары (бочка 200 л) в расходные емкости), комплектов пневмо- и электрооборудования.

Все узлы оборудования смонтированы на общей раме, обеспечивая компактный дизайн и возможность размещения в небольшом помещении. Для удобства перемещения по цеху ручную установку имеет опорные катки с интегрированным тормозом. Управление работой установки, ввод и контроль технологических параметров перерабатываемых компонентов осуществляется с интерактивной сенсорной панели оператора. Для световой и звуковой сигнализации установка оборудована световой колонной, которая подает разрешительные или запрещающие световые сигналы и предупреждения персоналу об аварийных и чрезвычайных ситуациях, связанных с безопасной работой оборудования.

Смесительное устройство, дозаторы и автоматизированная система управления – собственные разработки. Смесительное устройство машины отличается уникальным конструктивным исполнением, благодаря чему достигается высокое качество смешения компонентов, а современная система управления дозирующими насосами гарантирует точное поддержание производительности и соотношения компонентов.

Наличие удобной и технологичной системы управления на основе современного промышленного компьютера с сенсорным дисплеем 15" дает возможность программировать посредством команд и заранее подготовленных шаблонов. Все элементы комплектации шкафа управления, датчики и двигатели имеют унифицированные к международным стандартам конструкции и типы сигналов.

Также необходимо отметить, что пенополиуретановые системы оснащаются современными дозирующими насосами с частотно-регулируемыми приводами, что обеспечивает отличное качество смешения. Для контроля и корректировки расхода пенополиуретановой системы в линиях подачи установлены расходомеры, обеспечивающие точное измерение объемного расхода компонента.

Программа управления установкой «NIPFP dosing-mixing ТЛ1-02» предназначена для управления и мониторинга состояния заливочной установки. Программа выполняется на персональном компьютере под управлением ОС Windows версии от XP до Windows 10. Требования к быстродействию процессора и объему памяти минимальны. Программа не требует установки и может выполняться с любого накопителя. Единственным требованием к компьютеру является наличие папки C:\NIPFPFiles в корневом каталоге диска C. Управление установкой осуществляется по физической линии RS485. Скорость обмена 115200 бит в секунду. Для связи с установкой используется преобразователь USB-RS485 с обеспечением присутствия в системе виртуального COM порта. Настройка параметров самого порта осуществляется управляющей программой. Все параметры, касающиеся логики работы хранятся в файлах, называемых «программа». В каждый конкретный момент может быть загружена лишь одна программа. Изменение и сохранение параметров заливки возможно только в режиме «Настройка». Навигация по управляющей программе осуществляется прямым нажатием на экранные кнопки. Система меню не применяется. Все окна являются модальными, то есть возврат в предыдущее окно осуществляется выходом из вызванного окна.

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Установка имеет два основных режима – «Настройка» и «Работа». Режим «Настройка» предназначен для внесения и сохранения рабочих параметров в программах заливки, контроля состояния и проверки функционирования узлов, подготовки компонентов (нагрев, перемешивание), выполнение рециркуляции компонентов и тарирования. В этом режиме возможна порционная заливка смеси. Режим «Работа» предназначен для выполнения непрерывной заливки смеси (рисунок 2). Окно основного интерфейса программы в двух режимах содержит необходимую минимальную информацию о состоянии установки в целом и органы оперативного управления составными частями. Активность тех или иных кнопок управления зависит от выбранного режима.

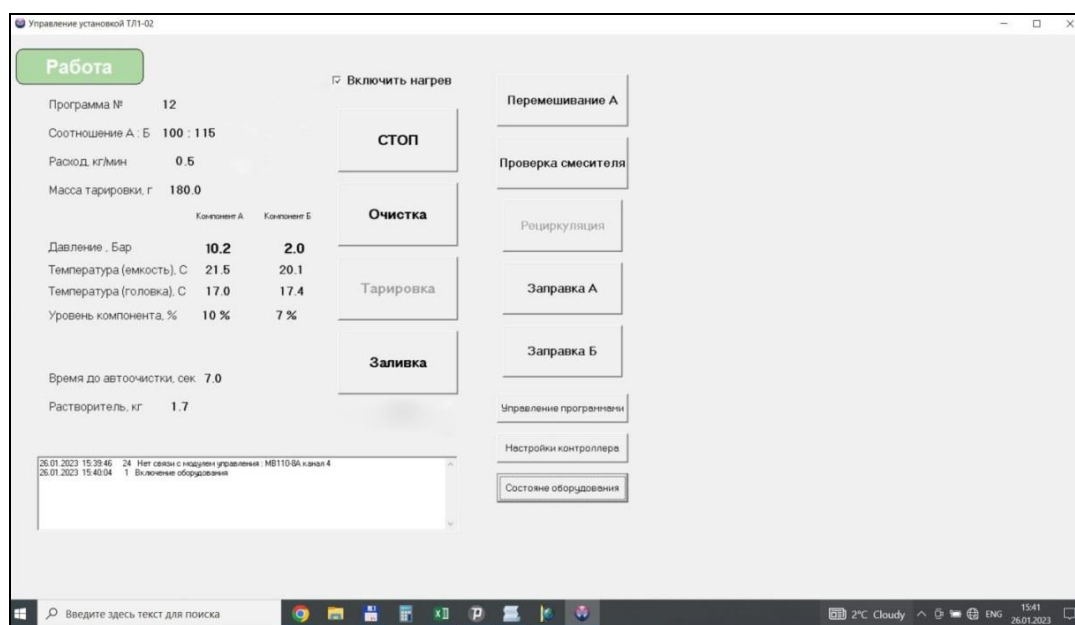


Рисунок 2 – Основное окно управляющей программы в режиме «Работа»

В основном экране также расположено окно вывода сообщений журнала событий. В журнале содержатся записи событий, проблем и неисправностей, времена их возникновения, код и описание события. Просмотр журнала доступен в текстовом редакторе – Блокнот (notepad.exe). Также для просмотра журнала можно использовать нашу специализированную программу «Journal.exe». Для управления и корректировки программ, получения полной информации о состоянии узлов кнопками управления открываются дополнительные окна.

Центральным узлом системы управления установкой является специализированный контроллер. Физически он расположен на панели внутри шкафа управления. С одной стороны, он связан с управляющим компьютером по интерфейсу RS485, с другой стороны он связан с управляемыми модулями установки по интерфейсу MODBUSRTU. Контроллер постоянно проводит диагностику составных частей установки и помещает актуальную информацию о состоянии в массив данных, передаваемых в персональный компьютер. В данной конфигурации контроллер является подчиненным устройством. Кроме сбора и отправки информации контроллер автоматически блокирует работу приводов насосов при обнаружении превышения давления компонентов в напорных магистралях, контролирует количество очистителя через тензодатчик, генерирует сигналы управления сервоприводами, обрабатывает сигналы с расходомеров. Вся остальная логика работы установки реализована на компьютере.

Установка воплощает в себе современные научные, инженерные решения и является универсальным оборудованием, а благодаря автоматизации технологического процесса (снижение трудозатрат и увеличение производительности) позволяет получать качественные изделия с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Оборудование характеризуется надежностью работы, универсальностью, максимальной производительностью, современным уровнем автоматизации, хорошим качеством изготавливаемой продукции и конкурентной стоимостью.

УДК 678.686

Васильева В. С., Василевская Л. Н., Гавриленко О. О., Калашников А. С., Ксенофонтов М. А.

## СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

Научно-исследовательское учреждение “Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко” Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Улучшение технологических, физико-механических, эксплуатационных и других свойств эпоксидных олигомеров возможно при использовании модифицирующих добавок различной природы и их концентрации. Введение в полимерную матрицу в качестве функциональных добавок таких наполнителей позволяет существенно оказать влияние на макромолекулярную структуру полимеров и целенаправленно изменять их свойства.

Основным классом материалов, удовлетворяющих жестким, часто противоречивым друг другу требованиям, таким как обеспечение минимальной массы конструкций, максимальной прочности, жесткости, надежности, долговечности при работе в тяжелых условиях нагружения, при высоких температурах и в агрессивных средах являются полимерные композиты. Возможности наполненных полимеров чрезвычайно широки благодаря разнообразности их составов, многообразию полимеров и наполнителей, способам их модификации. Способы получения полимерных композитов определяются как типом наполнителя, так и агрегатным состоянием полимера.

Неослабевающий интерес исследователей к ароматическим соединениям обусловлен не только тем, что они, будучи составной частью растительного мира, одновременно являются попутными продуктами переработки твердого топлива, но и способны с высокими скоростями вступать в реакции электрофильного и нуклеофильного замещения, что позволяет получать на их основе широкий спектр разнообразных веществ и материалов с полезными свойствами. Среди таких материалов особое место занимают газонаполненные полимеры (пенопласты), которые благодаря уникальному сочетанию небольшой объемной массы и высокой прочности с исключительно хорошими звуко- и теплоизоляционными свойствами нашли широкое применение в различных отраслях жизнедеятельности человека.

Получение газонаполненных полимеров представляет собой одностадийный процесс, в одном технологическом цикле которого происходит поликонденсация, вспенивание и отверждение высокореакционных мономерных композиций. Это оказалось возможным при использовании в реагирующих системах полифункциональных соединений, способных с высокими скоростями вступать в реакции электрофильного замещения, обладающих такой реакционной способностью, которая позволяет переводить жидкую вспененную композицию в полимеры пространственного строения при сохранении в объеме определенной концентрации газоструктурных элементов. Такой способ получения полимеров позволил исключить стадии выделения, нейтрализации, сушки продуктов, традиционно применяемых при производстве олигомеров – исходных продуктов для полимерных композитов, а также получить целый ряд эпоксидных полимеров с высокими физико-механическими свойствами.

Однако, до сих пор отсутствует достаточно ясная картина механизма протекания химических реакций и вытекающих из этого молекулярного строения полимерной матрицы, структуры газонаполненных ячеек, конформации макромолекул, что не позволяет однозначно установить взаимосвязь между строением и эксплуатационными свойствами наполненных полимеров.

При создании композиционных материалов среди широко применяемых композиций особое место занимают эпоксидные связующие, отличающиеся хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами. Эпоксидная смола - одна из разновидностей синтетических смол, представляющая собой соединение, содержащее не менее двух эпоксидных групп в молекуле. Эпоксидная смола нашла широкое применение в промышленности благодаря

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

следующим свойствам: превосходная химическая стойкость, хорошая адгезия к металлам, низкая влагопроницаемость, небольшая усадка при эксплуатации изделий из эпоксиполимеров.

Улучшение технологических, физико-механических, эксплуатационных и других свойств эпоксидных олигомеров возможно при использовании модифицирующих добавок различной концентрации и природы. Введение в полимерную матрицу в качестве функциональных добавок таких наполнителей позволяет существенно влиять на макромолекулярную структуру полимеров и целенаправленно регулировать их свойства.

Физико-механические свойства полимерных композитов зависят от числа как координационных внутри- и межмолекулярных связей, так и от поперечных химических связей и их расположения. С увеличением числа поперечных химических связей твердость полимера увеличивается, повышается модуль упругости и уменьшается величина относительной деформации, т.е. свойства сетчатого (пространственного) полимера приближаются к свойствам кристалла.

В данной работе представлены методики получения эпоксидных композитов с различным содержанием наполнителя. В качестве основы брали смолу ЭД-20, а наполнителем выбран шунгит (торговая марка таурит ТС-Д).

Эпоксидная смола ЭД-20 представляет собой олигомерное соединение, основу которого составляет диглицидиловый эфир дифенилолпропана

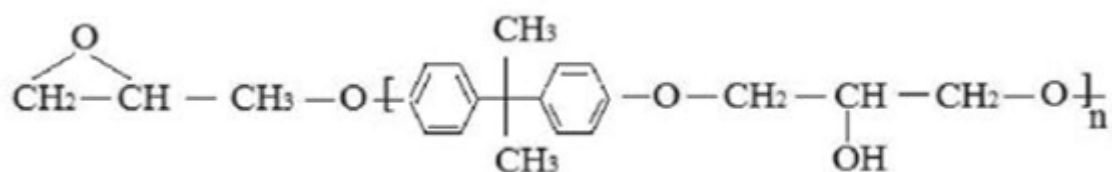


Рисунок 1 – Структурная формула эпоксидной смолы ЭД-20

Шунгит представляет собой композиционный материал с равномерным распределением высокодисперсных кристаллических частиц оксида кремния в аморфной углеродной матрице. Структура шунгита представлена на рисунке 2.

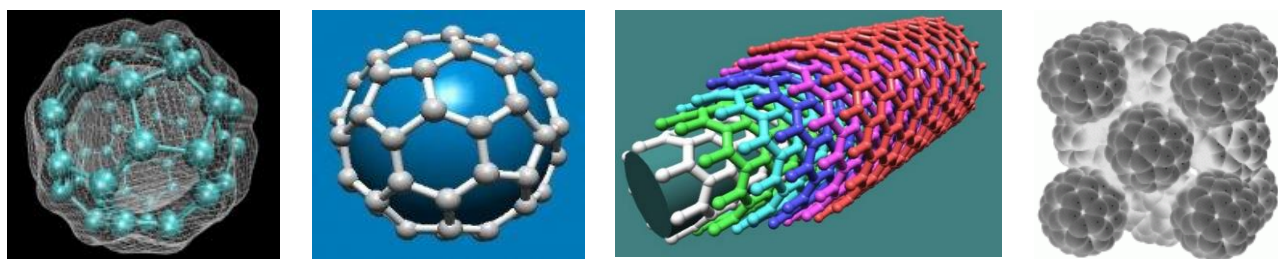


Рисунок 2 – Структура шунгита

Шунгит является аморфным микрогетерогенным композиционным материалом, включающим в себя тонкодисперсные фазы углерода в скрытокристаллической графитированной форме, диоксид кремния, микроэлементы в составе силикатов и других соединений, небольшое количество органических веществ и воду.

Установлено, что при формировании структуры эпоксидных полимерных композитов определяющими являются процесс межфазного взаимодействия, формирующий матрицу - основного компонента композита и ответственного за его физико-механические характеристики. Достижимый комплекс механических свойств модифицированных полимеров зависит от процесса равномерного распределения добавок и состава композиции.

УДК 535.34

Воеводина М. А., Зверев Д. А., Снигирев А. А.

## **РЕНТГЕНОВСКАЯ РЕФЛЕКТО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта – Калининград, Россия

В данной работе представлен метод рефлекто-интерферометрии для исследования кривых поверхностей с использованием сфокусированного рентгеновского пучка составными преломляющими линзами. Метод был применен для *in-situ* исследования слоя графена расположенного на поверхности капли расплавленной меди, имеющей естественную кривизну. Эксперимент был проведен на источнике синхротронного излучения на станции ID10. В результате была получена рефлекто-интерферограмма, на основании которой удалось оценить шероховатость границы раздела сред медь/графен, толщину и плотность слоя меди и слоя графена.

Классический метод рентгеновской рефлектометрии основан на измерениях интенсивности рентгеновского излучения, отраженного от тонкослойных структур, в зависимости от угла падения рентгеновских лучей. Метод широко используется для получения информации о толщине, шероховатости и плотности исследуемых слоев. Однако, из-за малых углов падения рентгеновского излучения на образец, рассматриваемый подход представляется наиболее эффективным для исследования плоских тонкопленочных структур с большой площадью поверхности. Так образом метод обладает низким пространственным разрешением, что накладывает ограничение на исследования большого класса образцов, таких как искривленные поверхности, или структуры с переменной толщиной слоев.

В данной работе мы представляем метод рефлекто-интерферометрии для исследования изогнутых поверхностей с использованием сфокусированного рентгеновского пучка составными преломляющими линзами. При освещении искривленной поверхности сфокусированным пучком микрометрового размера достигается высокая локальность исследования, при этом широкий диапазон отраженных углов определяемый в основном радиусом кривизны поверхности обеспечивает возможность наблюдения репрезентативной части рефлекто-интерферограммы без использования углового сканирования. Благодаря этому, преимуществами рассматриваемого подхода является высокое пространственное и временное разрешение. Рентгеновский рефлекто-интерферометр был применен для *in-situ* исследования слоя графена расположенного на поверхности капли расплавленной меди, имеющей естественную кривизну. В результате эксперимента была получена рефлекто-интерферограмма, на основании которой удалось оценить шероховатость границы раздела сред медь/графен, толщину и плотность слоя меди и слоя графена. Стоит отметить, что предложенный метод может быть применен для исследования любой искривленной поверхности.

### Список литературы

1. Konovalov O. V. et al. X-ray reflectivity from curved surfaces as illustrated by a graphene layer on molten copper //Journal of Synchrotron Radiation. – 2022. – Т. 29. – №. 3.

УДК 539.211:539.22

Волков Ю. О.<sup>1</sup>, Нуждин А. Д.<sup>1</sup>, Рошин Б. С.<sup>1</sup>, Муслимов А. Э.<sup>1</sup>, Толстихина А. Л.<sup>1</sup>, Прохоров И. А.<sup>1</sup>, Аргунова Т. С.<sup>2</sup>, Лебедев С. П.<sup>2</sup>, Лебедев А. А.<sup>2</sup>, Асадчиков В. Е.<sup>1</sup>

## МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ШЕРОХОВАТОСТИ РЕЛЬЕФА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

<sup>1</sup> ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Обоснована применимость комплексной методики, включающей рентгеновскую рефлектометрию, незеркальное рентгеновское рассеяние и атомно-силовую микроскопию, для характеристики ориентированных террасно-ступенчатых структур на поверхности отожжённых пластин сапфира и карбида кремния. Показано, что данное сочетание методов позволяет получить совокупность статистических параметров, наиболее полно характеризующих регулярные свойства рельефа структурированной поверхности.

Современные технологии синтеза эпитаксиальных структур с наноразмерными толщинами слоёв предъявляют строгие требования к качеству подготовки кристаллических подложек. В частности, специфика эпитаксиального осаждения полупроводников группы III-нитридов на лейкосапфире ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) [1] и графена на карбиде кремния (SiC) [2] обуславливает использование наноструктурированных террасно-ступенчатых поверхностей, сформированных на вицинальном срезе одной из основных кристаллографических плоскостей с последующим высокотемпературным отжигом. Качество эпитаксиальной структуры, таким образом, зависит как от уровня полировки подложки, так и от статистической регулярности ступенчатого рельефа.

Предложенная авторами методика контроля рельефа сочетает использование атомно-силовой микроскопии (АСМ) с измерениями незеркального рентгеновского рассеяния (РР) и рентгеновской рефлектометрии. Существенным преимуществом рентгеновских методов является большая по сравнению с АСМ область измерения в плоскости поверхности, а также возможность *in-situ* измерений непосредственно в процессе эпитаксиального синтеза. Также данные РР позволяют непосредственно рассчитать спектр автокорреляционной функции высот шероховатости (PSD) [3], который, в отличие от традиционно используемых интегральных параметров шероховатости, представляет полное статистическое описание рельефа границы раздела в более широком пространственном диапазоне. Наконец, анализ данных рефлектометрии позволяет извлечь информацию о распределении объёмной плотности в приповерхностном слое образца толщиной до 100 Å.

В работе представлены результаты исследований образцов монокристаллических подложек из лейкосапфира ориентации (0001) и (01-12), а также карбида кремния ориентации (0001), отожжённых в вакууме при 1200°C. Измерения АСМ были проведены на зондовых микроскопах Quanta и P47 (NT-MDT); измерения РР были проведены на лабораторном дифрактометре ДРШ (ФНИЦ КиФ РАН) [4] на длине волны  $1.5405 \pm 0.0002$  Å (энергия излучения  $\approx 8052$  эВ) при суммарной интенсивности  $\sim 10^6$  имп/с. Рассчитанные PSD-спектры для АСМ и РР данных находятся в хорошем взаимном согласии (Рис. 1). Показано, что учёт характерных особенностей PSD-спектров, соответствующих террасной наноструктуре на поверхности, при измерениях в различных латеральных направлениях позволяет с хорошей точностью определить пространственную ориентацию, шаг и статистический разброс периода регулярного нанорельефа. Анализ данных рентгеновской рефлектометрии в различных латеральных направлениях показывает зависимость структуры окисного слоя на поверхности подложки от ориентации регулярного нанорельефа.

Совокупность полученных результатов показывает лучшую применимость и практическую эффективность использованной авторами комбинированной методики по сравнению с традиционными методами (в частности, локальной АСМ, лазерной профилометрией и просвечивающей электронной микроскопией).



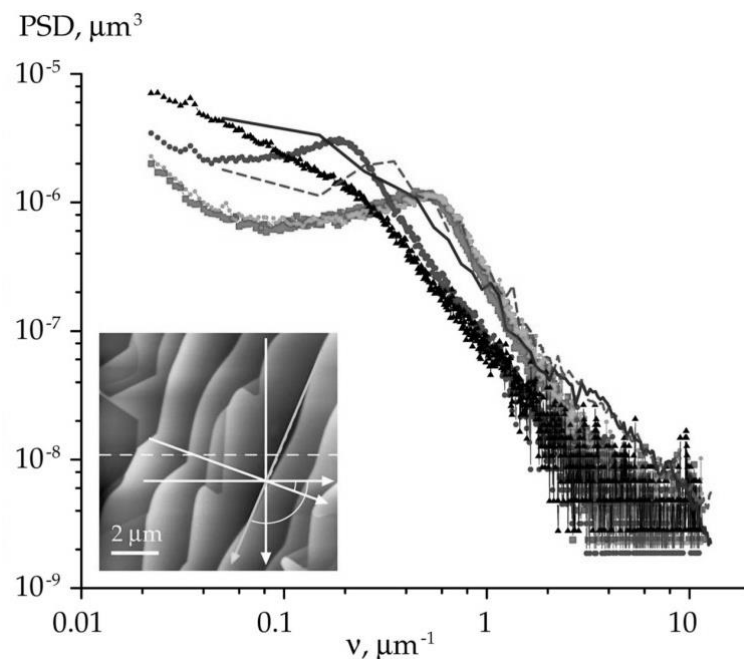


Рисунок 1 – PSD-спектры шероховатости, рассчитанные в различных латеральных направлениях по данным АСМ (сплошные линии) и РР (точки) для наноструктурированной поверхности подложки SiC. Врезка: АСМ-скан участка поверхности с указанием латеральной геометрии измерений.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-1349).

#### Список литературы

1. Huang X.R., Bai J.W., Dudley M., Dupuis R.D. and Chowdhury U. // *Appl. Phys. Lett.* – 2005 – V. 86(21) – P. 211916.
2. Virojanadara C., Syväjärvi M., Yakimova R., Johansson L.I., Zakharov A.A. and Balasubramanian T. // *Phys. Rev. B* – 2009 – V. 78 – P. 245403.
3. Kozhevnikov I.V. and Pyatakhin M.V. // *J. X-Ray Sci. Technol.* – 1998 – V. 8 – P. 253-275.
4. Асадчиков В.Е., Бабак В.Г., Бузмаков А.В. и др. // *ПТЭ* – 2005 – № 2 – С. 1-9.

УДК 621.315:541.16

Горбачук Н. И.<sup>1</sup>, Поклонский Н. А.<sup>1</sup>, Ермакова Е. А.<sup>1</sup>, Шпаковский С. В.<sup>2</sup>, Ломако В. М.<sup>3</sup>

## DLTS-СПЕКТРОСКОПИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ СТРУКТУРАХ Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО “Интеграл” управляющая компания холдинга “Интеграл”, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>НП ООО “ОМНИТЕЛ”, Минск, Беларусь

Исследовались структуры Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si, облученные ионами гелия флюенсом  $10^{11}$  см<sup>-2</sup> (кинетическая энергия иона 5 МэВ). Регистрировались спектры DLTS, т.е. зависимости емкости от температуры, а также изотермические вольт-фарадные характеристики. Установлено, что варьирование электрического напряжения заполнения и напряжения эмиссии позволяет независимо регистрировать сигналы DLTS как от центров, локализованных на границе раздела Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si, так и от радиационных дефектов в глубине кремния. Показано, что облучение ионами гелия приводит как к генерации дивакансий и комплексов вакансия-кислород и вакансия-фосфор, так и к увеличению концентрации дефектов на границе раздела.

**Введение.** Методика DLTS-спектроскопии является одной из базовых методик для диагностики радиационных повреждений в материалах и структурах полупроводниковой электроники [1]. Для ее реализации необходим энергетический барьер и области пространственного заряда в полупроводнике. Релаксация барьерной емкости после импульсов напряжения экстракции (инъекции) носителей заряда при различных температурах позволяет построить так называемый DLTS-спектр. Из-за вхождения МДП-структур в режим инверсии и влияния поверхностных состояний DLTS-спектроскопия для их исследования применяется ограниченно [2, 3].

Цель работы — оценить возможности использования DLTS-спектроскопии для исследования радиационных дефектов в структурах Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si, облученных ионами гелия.

**Методика эксперимента.** Структуры Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния *n*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Удельное сопротивление кремния — 4,5 Ом·см. Толщина пластин — 380 мкм. Слой нитрида кремния (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) толщиной  $d = 70$  нм формировался методом химического осаждения из газовой фазы, содержащей смесь аммиака (NH<sub>3</sub>) и моносилана (SiH<sub>4</sub>), при пониженном давлении. Контакты к планарной и непланарной (тыловой) стороне формировались термическим напылением алюминия с последующей термообработкой при температуре 400 °С в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия — 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации на планарной стороне МДП-структур — 1,85×1,85 мм<sup>2</sup>. Пластины кремния разделялись на чипы площадью 2,5×2,5 мм<sup>2</sup>.

Со стороны Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> структуры облучались ионами гелия (энергия 5 МэВ, средний проективный пробег, рассчитанный по программе SRIM  $\approx 24$  мкм). Облучение проводилось при комнатной температуре на ускорителе Рурского университета (г. Бохум, Германия). Флюенс облучения —  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>.

Спектры DLTS регистрировались с помощью емкостного спектрометра CE-7C в диапазоне температур 80–300 К. Значения напряжения импульса заполнения  $U_p$  и импульса эмиссии  $U_e$  выбирались, исходя из необходимости зарегистрировать спектры центров, расположенных вблизи границы раздела Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si, или в глубине *n*-Si. В первом случае величина  $U_p$  выбиралось в окрестности напряжения плоских зон, а  $U_e$  — в интервале от  $U_p$  до  $-7$  В. Во втором случае значения  $U_p$  и  $U_e$  выбирались в интервале от  $-7$  до  $-20$  В. Длительность импульса заполнения составляла  $t_p = 0,75$  мс, эмиссии —  $t_e = 20$  мс. Нагрев до последующего значения температуры и ее стабилизация осуществлялся в условиях приложенной к структуре внешней разности электрических потенциалов  $U_e$ . Нормированный спектр DLTS рассчитывался согласно формуле:

$$S = [\Delta C(t_2) - \Delta C(t_1)]/C_0, \quad (1)$$

где  $\Delta C(t)$  — изменение нестационарного значения барьерной емкости, регистрируемое в течение импульса эмиссии (на частоте измерительного сигнала 1 МГц);  $t_1$  и  $t_2$  — некоторые моменты времени, причем  $t_1 < t_2 < t_e$ ;  $C_0$  — стационарное значение высокочастотной емкости при текущей температуре [1, 4].

Вольт-фарадные характеристики  $C(U)$  регистрировались в интервале от  $-40$  до  $0$  В с шагом  $0,1$  В при температурах  $80$ – $300$  К на измерителях LCR Agilent 4284A, E4980A и емкостном спектрометре CE-7C. Все измерения выполнялись в темноте.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 1 представлены зависимости емкости от температуры, зарегистрированные при напряжениях  $U_e$ . Рост емкости в окрестности  $260$  К для исходной и  $245$  К для облученной структур связан с переходом в процессе измерения в режим инверсии. В интервалах температур  $80$ – $260$  К (для исходной структуры) и  $80$ – $245$  К (для облученной) особенностей на зависимостях  $C(T)$ , обусловленных формированием инверсного слоя, нет. В указанных интервалах температур структуры, как видно на вставках, находятся в режиме глубокого обеднения. Это позволяет провести регистрацию спектров DLTS при напряжениях  $U_e$ , соответствующих при комнатной температуре режиму инверсии.

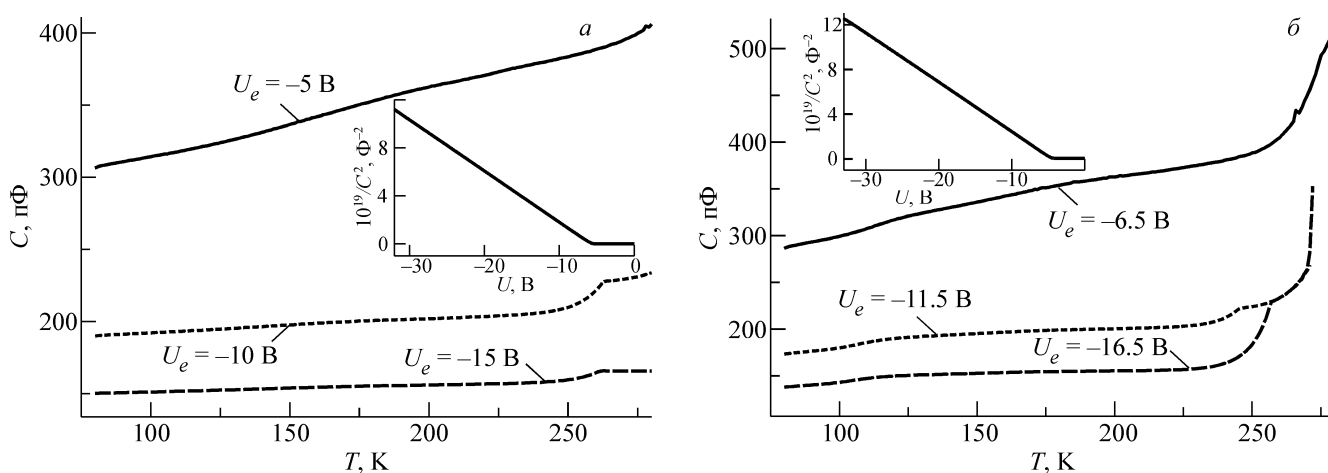


Рисунок 1 – Зависимости емкости  $C$  от температуры  $T$  для исходной (а) и облученной ионами гелия (б) структур. Значения напряжения, при которых измерены зависимости  $C(T)$ , указаны на рисунке.

На вставках – вольт-фарадные характеристики в координатах  $1/C^2$ , зарегистрированные при температуре жидкого азота

На рисунке 2 показаны спектры DLTS исходной и облученной структур. Спектры 1 соответствуют центрам, расположенным вблизи границы раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ . Для исходной структуры спектр имеет вид широкого бесструктурного сигнала «треугольной формы». Для облученной структуры наряду с увеличением амплитуды сигнала в области низких температур ( $< 150$  К) отчетливо наблюдается пик Е1. Результаты согласуются с данными работы [5], в которой показано, что причиной появления широкого сигнала DLTS для исходных структур  $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$  является эмиссия электронов с поверхностных состояний (центров), уровни которых распределены в широком интервале энергий.

Спектры 2, 3 соответствуют центрам, расположенным в глубине  $n\text{-Si}$ . Широкий сигнал на них отсутствует. Пики Е1-Е3 сигналов DLTS наблюдаются лишь на спектрах облученных структур (рис. 2б). Пики связаны с эмиссией электронов с глубоких уровней радиационных дефектов. На основании зависимостей Аррениуса рассчитаны значения энергии термической ионизации. Пика Е1 соответствует уровню  $E_c - 0,17 \pm 0,02$  эВ, пику Е2 —  $E_c - 0,22 \pm 0,02$  эВ, пику Е3 —  $E_c - 0,46 \pm 0,04$  эВ. Энергии активации, характерные для пиков Е1 и Е2, достаточно близки [6] к энергиям А-центра (комплекса вакансия-кислород) и дивакансии в зарядовом состоянии (=/-). Пик Е3 возможно соответствует неразрешенному сигналу от дивакансий в зарядовом состоянии (-/0) и от комплекса вакансия-фосфор [7]. Эффективная энергия ионизации, полученная для пика  $E_x$  равна  $E_c - 0,35 \pm 0,06$  эВ.

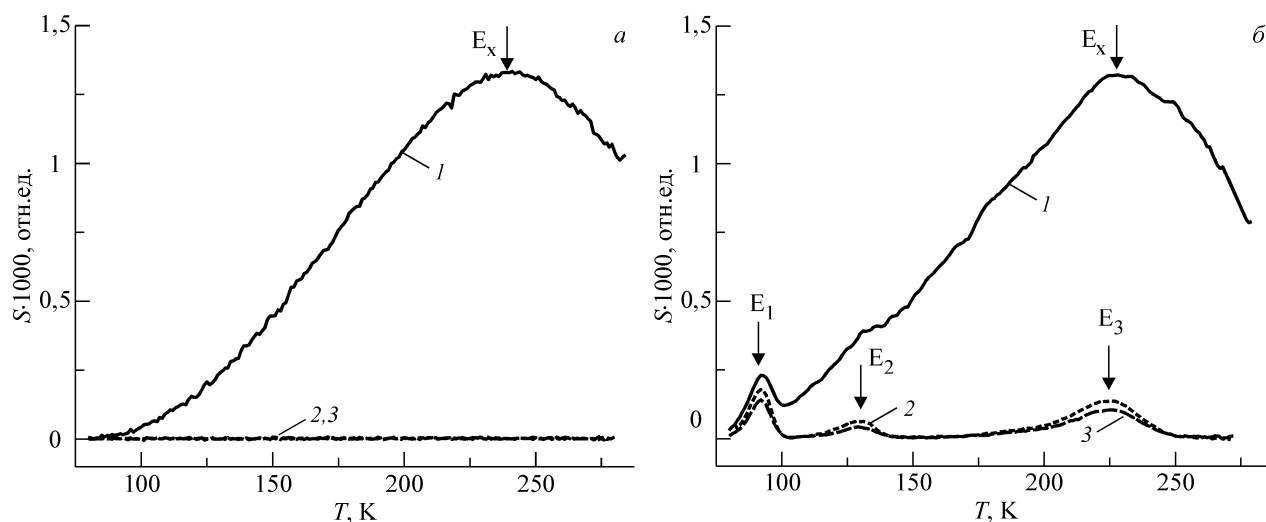


Рисунок 2 — Спектры DLTS исходных (а) и облученных ионами гелия (б) структур. Условия регистрации на рис. а: 1 —  $U_p = -2,4$  В,  $U_e = -5$  В; 2 —  $U_p = -5$  В,  $U_e = -10$  В; 3 —  $U_p = -10$  В,  $U_e = -15$  В. Условия регистрации на рис. б: 1 —  $U_p = -3,8$  В,  $U_e = -6,5$  В; 2 —  $U_p = -6,5$  В,  $U_e = -11,5$  В; 3 —  $U_p = -11,5$  В,  $U_e = -16,5$  В

**Заключение.** Установлено, что варьирование напряжения заполнения и напряжения эмиссии позволяет независимо регистрировать сигналы DLTS от центров, локализованных на границе раздела  $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ , и от радиационных дефектов в глубине кремния. Показано, что облучение ионами гелия приводит как к генерации дивакансий и комплексов вакансия-кислород и вакансия-фосфор, так и к росту концентрации дефектов на границе раздела.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

#### Список литературы

1. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. — М.: Наука, 1988. — 192 с.
2. Deep level transient spectroscopy study of defects at  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  and  $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$  interfaces / В. С. Johnson, Н. U. Rahman, E. Gauja, R. Ramer, J. C. McCallum // ICONN 2010 Int. Conf. on Nanosci. and Nanotechnol., 22-26 February 2010, Sydney, Australia. — IEEE, 2010. — P. 333–336.
3. A deep-level transient spectroscopy study of silicon interface states using different silicon nitride surface passivation schemes / С. Gong, E. Simoen, N. Posthuma, E. Van Kerschaver, J. Poortmans, R. Mertens // Appl. Phys. Lett. — 2010. — Vol. 96, № 10. — P. 103507 (1–3).
4. Цифровой емкостный спектрометр СЕ-6 / Н. Н. Дедович, В. А. Кузьминых, А. Н. Лазарчик, В. М. Ломако, В. И. Пранович, А. Ф. Романов // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 сент. 2008 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. — Мн.: БГУ, 2008. — С. 16–19.
5. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней структур  $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$  / Н. И. Горбачук, Н. А. Поклонский, Е. А. Ермакова, С. В. Шпаковский // КРЕМНИЙ 2022: Тез. докл. XIV Междунар. конф., Новосибирск, 26-30 сент. 2022 г. — М.: Изд. «Перо», 2022. — С. 135.
6. P. Hazdra, V. Komarnitsky. Influence of radiation defects on formation of thermal donors in silicon irradiated with high-energy helium ions // Mater. Sci. Eng. B. — 2009. — Vol. 159–160. — P. 346–349.
7. V. P. Markevich, O. Andersen, I. F. Medvedeva, J. H. Evans-Freeman, I. D. Hawkins, L. I. Murin, L. Dobaczewski, A. R. Peaker. Defect reactions associated with the dissociation of the phosphorus–vacancy pair in silicon // Physica B. — 2001. — Vol. 308–310. — P. 513–516.

## УСЛОВИЯ СИНТЕЗА И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ЗАМЕЩЕНИЯ $Sb_{2-x}M_xTe_3$ (M- Cr, Fe; $0 \leq x \leq 0,15$ )

<sup>1</sup> ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

<sup>2</sup> УО «Белорусский национальный технический университет», Минск, Беларусь

### Введение

Твёрдые растворы замещения представляют интерес в связи с тем, что их базовое соединение  $Sb_2Te_3$  относится к веществам, носящим общее название топологические изоляторы [1-4]. Одной из важных особенностей топологических изоляторов является то, что будучи изоляторами внутри объёма, поверхность их не обладает свойствами обычной металлической проводимости. Движение носителей заряда на поверхности топологического изолятора происходит одновременно в двух взаимно противоположных направлениях: электроны со спином «вверх» движутся в одном направлении, а со спином «вниз» — в противоположном. Эксперимент показывает, что топологические изоляторы обладают нестандартными поверхностными электронными состояниями и электромагнитными свойствами. Это способствует реализации их применения в технических устройствах. Топологические изоляторы востребованы технологами приборостроения. Анализ особенностей их физико-химических характеристик в зависимости от условий внешних воздействий актуален и представляет несомненный интерес теоретикам физики конденсированного состояния для математического моделирования свойств. **Цель работы:** синтез составов  $Sb_2Te_3$ ,  $Sb_{2-x}Cr_xTe_3$ ,  $Sb_{2-x}Fe_xTe_3$ , изучение особенностей их кристаллической структуры.

### Синтез образцов

Соединение  $Sb_2Te_3$  синтезировано методом прямого сплавления элементов сурьмы и теллура высокой чистоты в вакууме. Образцы твердых растворов замещения с содержанием составов элементов железа и хрома в интервале концентраций  $0 \leq x \leq 0,15$  составов  $Sb_{2-x}Cr_xTe_3$ ,  $Sb_{2-x}Fe_xTe_3$  получены методом твердофазных реакций [5]. Температурно-временная последовательность синтеза схематически представлена на рисунке 1.

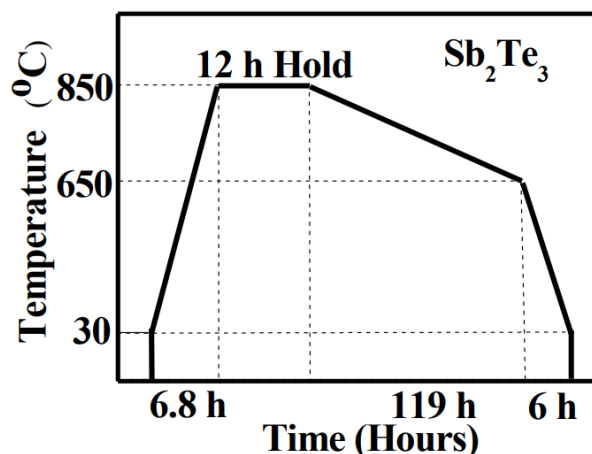


Рисунок 1 – Изменение температуры со временем синтеза  $Sb_2Te_3$ ,  $Sb_{2-x}Cr_xTe_3$ ,  $Sb_{2-x}Fe_xTe_3$ .

Образцы после синтеза представляли собой плотные слитки светло-серого цвета.

### Результаты рентгеноструктурного анализа

Методом дифракции рентгеновских лучей в  $Cu K\alpha$ -излучении при комнатной температуре установлено, что синтезированные составы обладают кристаллической структурой ромбоэдрической сингонии, пространственной группы S.G.:  $R\bar{3}m$ .

На примере состава  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , на рисунке 2 приведена рентгенограмма, характерная для синтезированных составов твердых растворов замещения  $\text{Sb}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_{2-x}\text{Fe}_x\text{Te}_3$ .

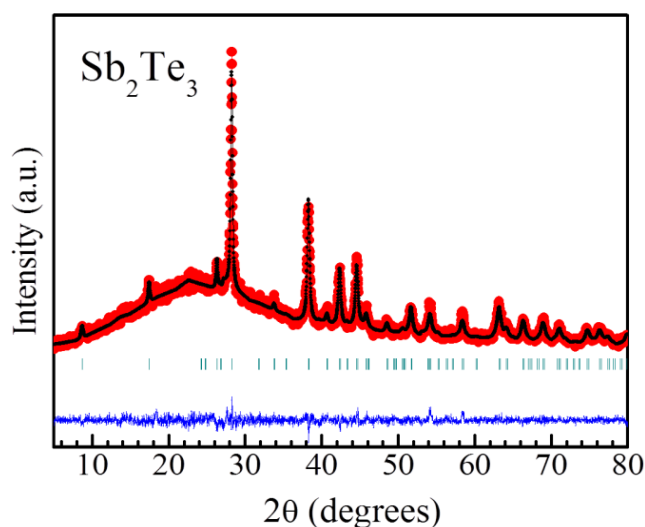


Рисунок 2 – Рентгенограмма базового соединения  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ .

Выявлено, что все рефлексы, наблюдаемые на рентгенограммах синтезированных составов, находится в корреляции со сведениями международной базы данных PCPDFWIN v.2.00, JCPDS 1998 (card 65-3678, 15-08774, 71-0393, 89-6185). Определены параметры элементарных кристаллических ячеек, величины осевых соотношений  $c/a$  и их объём. Установлено, что параметр  $a$  элементарной ячейки заключен в интервале значений  $4,23 \text{ \AA} < a \leq 4,25 \text{ \AA}$ , величина параметра  $c$  имеет значения в пределах  $30,11 \text{ \AA} < c \leq 30,33 \text{ \AA}$ , изменение осевого соотношения заключено в интервале величин  $7,07 < c/a \leq 7,12$ . Величина объёма элементарной ячейки изменяется от  $475,54 \text{ \AA}^3$  до  $469,55 \text{ \AA}^3$ .

### Выводы

Анализ полученных данных эксперимента методом дифракции рентгеновских лучей указывает на то, что элементарная кристаллическая ячейка исследуемых составов искажена в направлении кристаллической оси  $c$ . Величина параметра  $a$  элементарной ячейки практически не изменяется при замещении сурьмы ионами хрома и железа. Осевое соотношение  $c/a$  при этом также указывает на значительную деформацию элементарной кристаллической ячейки образцов синтезированных составов топологических изоляторов  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_{2-x}\text{Fe}_x\text{Te}_3$ . Параметр  $c$  и осевое соотношение  $c/a$  ромбоэдрической кристаллической структуры изменяются на 0,7- 0,8%.

### Список литературы

1. Hasan, M. Z. & Kane, C. L. Colloquium: Topological insulators. Rev. Mod. Phys. 82, 3045–3067 (2010). doi: 10.1103/RevModPhys.82.3045.
2. Qi, X.-L. & Zhang, S.-C. Topological insulators and superconductors. Rev. Mod. Phys. 83, 1057–1110 (2011). doi: 10.1103/RevModPhys.83.1057.
3. Mal'shukov, A. G. & Chu, C. S. Spin Hall effect in a Josephson contact. Phys. Rev. B 78, 104503 (2008). doi: 10.1103/PhysRevB.78.104503.
4. Vocquillon, E. et al. Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe. Nature Nanotechnology 12, 137–143 (2017). doi: 10.1038/nano.2016.159.
5. Янушкевич К.И. Твердые растворы монохалькогенидов 3d-металлов. Минск, (2009).- 256 с.

УДК 535.34+541.13

Гурский А. Л.<sup>1</sup>, Касич А.<sup>1</sup>, Будько А.<sup>2</sup>, Луговский А. П.<sup>2</sup>, Луговский А. А.<sup>1</sup>,  
Лапаник В. И.<sup>2</sup>, Тимофеев С. В.<sup>2</sup>

## ПРИГОТОВЛЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И НАНОГЛИНЫ, ЛЕГИРОВАННОЙ ХИРАЛЬНОЙ ЧЕТВЕРТИЧНОЙ АММОНИЕВОЙ СОЛЮ

<sup>1</sup>Учреждение БГУ «Республиканский центр проблем человека», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

В данной работе установлено, что добавки наночастиц монтмориллонита, модифицированные четвертичной аммониевой солью, содержащей хиральное моно- и биарильное звено, в нематические и сегнетоэлектрические жидкие кристаллы оказывают позитивное влияние на их свойства. Соли четвертичного аммония получали из легкодоступных ароматических оксикислот, хиральных спиртов и третичного амина.

Наноконпозиты, состоящие из неорганических и органических соединений, вызывают интерес исследователей из-за уникальных свойств, которыми они обладают [1-2]. Физические и электрооптические характеристики жидких кристаллов могут быть изменены путем добавления наночастиц. Имея большую поверхность, высокую емкость катионного обмена и будучи недорогим, монтмориллонитовая глина становится важным материалом, используемым для армирования систем, жидкий кристалл/глина [3]. Также сообщалось, что добавление монтмориллонита, модифицированного четвертичным аммонием, к жидким кристаллам благотворно влияет на характеристики материала [4]. Принимая во внимание, что введение молекулярной хиральности в жидкие кристаллы является еще одним важным инструментом для получения продуктов с уникальными свойствами, мы синтезировали хиральные четвертичные аммониевые соли **7**, модифицировали этими соединениями монтмориллонитовую глину и исследовали ключевые характеристики нематических и сегнетоэлектрических жидких кристаллов, легированных наночастицами.

Синтез четвертичных аммониевых солей **7a-c**, необходимых для модификации наночастиц, начался с коммерческой 4'-гидрокси-4-бифенилкарбоновой кислоты (**1**) или этил-4-гидроксибензоата (**8**). Сперва гидроксикислоту **1** этерифицируют бутанолом, а затем полученный эфир **2** вводят в реакцию Мицунобу с хиральными спиртами **3a** и **3b**. Восстановление сложноэфирной группы в **4a-b** осуществляли с помощью LiAlH<sub>4</sub> с получением бензиловых спиртов **5a-b**. Гидроксильная группа в соединении **5a** была преобразована в бромид реакцией с PBr<sub>3</sub>, а **5b** – в бромид **6b** реакцией с HBr в уксусной кислоте при 80°C. Окончательно, мы получили целевые четвертичные аммониевые соли **7a-b** путем нагревания бромидов **6a-b** и додецилдиметиламина в бутаноне. Продукт **7c** был синтезирован в соответствии с той же последовательностью стадий, что и для получения соединения **7b**, только начальным соединением был гидроксиэфир **8**. Нужный легированный монтмориллонит получали добавлением ацетонового раствора солей **5-7** к суспензии глины в воде.

Строение полученных соединений хорошо подтверждают результаты масс-спектрометрии. Для всех конечных продуктов **7a-c** было установлено соответствие молекулярного иона со структурой. Также были записаны спектры протонного магнитного резонанса, которые подтверждают низкое содержание (менее 1%) примесей в полученных субстанциях.

Легирование наночастиц, полученных из **7b**, в сегнетоэлектрические жидкие кристаллы привело к увеличению спонтанной поляризации на 30%, увеличению угла наклона на 20% и уменьшению шага спирали на 35%. Кроме того, были исследованы диэлектрические и электрооптические свойства нематических жидких кристаллов, легированных такими наночастицами. Диэлектрическая анизотропия для легированных смесей увеличилась примерно в 1,3 раза, а пороговое напряжение и время переключения уменьшились на 30-40%.

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Следует отметить тот факт, что частицы этого типа равномерно смешиваются с жидкими кристаллами и удерживаются в объеме в течение длительного времени, по-видимому, за счет межмолекулярных взаимодействий между молекулами ЖК и хиральным фрагментом. При этом значительных различий между производными алкоксифенолята или алкоксифенила по влиянию на электрооптические свойства нематических ЖК выявлено не было.

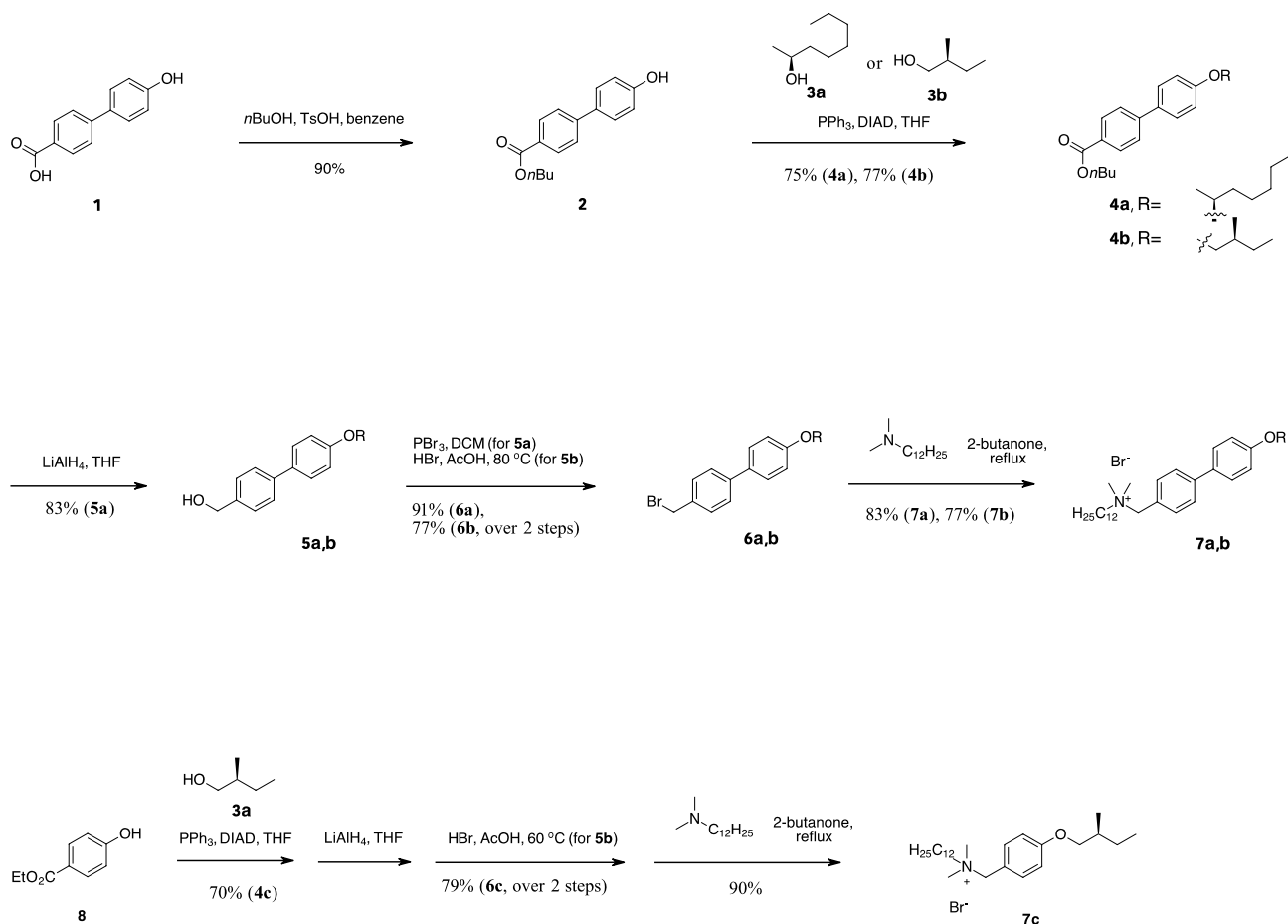


Рисунок 1 – Схема синтеза четвертичных аммониевых солей 7а-с.

Таким образом, синтезированные четвертичные аммонийные соединения на основе алкоксифенолята или алкоксифенила с хиральными фрагментами являются перспективными компонентами сегнетоэлектрических и нематических жидких кристаллов с улучшенными электрооптическими свойствами.

#### Список литературы

1. Shi L., Wang X., Lu L., Yang X., Wu X. Preparation of TiO<sub>2</sub>/polyaniline nanocomposite from a lyotropic liquid crystalline solution. // *Syn. Met.* – 2009. – №159. – С. 2525.
2. Tsai T. Y., Lee C. Y., Lee C. J., Chang W. C., Lee W., Chen P. C. Preparation and characterization of polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) with different cation exchange capacity (CEC) clays. // *J. Phys. Chem. Solids.* – 2010. – №71. – С. 595.
3. Martinez-Gomez A., Perez E., Alvarez, C. Effect of the intercalated/exfoliated nanostructure on the phase transformations of smectic polyester/layered silicate hybrids: Reinforcement of the liquid-crystalline matrix. // *Polymer.* – 2009. – №50. – С.1447.
4. V. Lapanik, A. Lugovsky, S. Timofeev Physico-chemical and electro-optical properties of liquid crystals doped with chemically modified nanocline minerals. // *Journal of Belarusian State University. Physics.* – 2020. – №3. – С.76.



## ТОНКАЯ ПОЛИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ ШПИНЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Показано, что путем финишной виброполировки шпинели с использованием УДА в качестве абразивного материала возможно добиться существенного улучшения качества обработки поверхности и получать подложки с уровнем шероховатости поверхности  $R_a \leq 1$  нм.

Шпинель (алюмината магния  $MgAl_2O_4$ ) представляет собой прозрачную керамику с кубической кристаллической структурой, обладающую превосходным оптическим пропусканием в диапазоне от 0,2 до 5,5 мкм, а также хорошими механическими свойствами и эрозивной стойкостью [1-3]. Благодаря этому, шпинель является привлекательным материалом для использования в широком спектре оптоэлектронных приложений, которые требуют отличного пропускания от видимого до среднего ИК диапазона (например, изготовление окон для высокоэнергетических лазеров). Кроме того, шпинель является перспективной подложкой для наращивания тонких пленок соединений типа  $A_3B_5$  для спиновой электроники [2]. Все эти приложения требуют качественной обработки поверхности. Однако шпинель характеризуется высокой твердостью (до 20 ГПа), большой хрупкостью и химической инертностью, что усложняет абразивную обработку этого материала и сильно ограничивает его применимость в опто-электронике. В настоящее время исследуются различные подходы к обработке поверхности шпинели, включая химико-механическую полировку, пластическое шлифование, алмазное точение и ионное травление [3-9]. Но до сих пор не удалось добиться чистоты обработки поверхности, необходимой для эпитаксиального наращивания высококачественных тонких пленок соединений типа  $A_3B_5$  ( $R_a \leq 1$  нм). В настоящей работе исследуется возможность улучшения качества обработки поверхности шпинели путем использования в качестве абразивного материала ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза (УДА).

Исходные заготовки шпинели имели размеры 10x10x2 мм. В процессе изготовления подложек шлифовка и полировка их базовых плоскостей проводилась на разработанной технологической оснастке. В качестве обрабатывающего инструмента использовался чугунный диск, шаржированный алмазным порошком АСН с зернистостью 20/14, 10/7, 5/3 и 2/1 мкм. Диаметр диска равен 140 мм, а скорость вращения алмазного круга – 2800 оборотов в минуту. Последовательным шлифованием противоположных сторон вырезанных кристаллов формируется подложка. Для финишной чистовой полировки применялась специально разработанная виброполировальная установка. Полирующей смесью являлась водная эмульсия ультрадисперсных алмазов марки УДА-ГО производства ЗАО «Синта» (Минск, Беларусь). Согласно информации производителя, данный материал представляет собой продукт взрывного разложения смеси взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом и имеет характерный размер зерна 4-6 нм [10]. Благодаря наличию на поверхности большого количества свободных радикалов, отдельные частицы УДА образуют прочные агрегаты размером несколько десятков нанометров. Длительность финишной полировки составляла 40 часов. Промывка подложек после полировки осуществлялась в ацетоне (хч) в ультразвуковой ванне. Исследование морфологии поверхности подложек после обработки проводилось методом атомно-силовой силовой микроскопии (АСМ) на АСМ микроскопе «Solver P47 Pro» (Россия).

Результаты эксперимента приведены на рисунке 1. Видно, что на поверхности обработанной подложки (рис. 1а и б) содержится большое количество частиц размером от 20 до 160 нм. Размер частиц указывает на то, что это частицы абразива (агрегаты УДА). По-видимому,

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

в процессе виброполировки, благодаря наличию на поверхности большого количества свободных радикалов, отдельные частицы УДА образуют достаточно прочные ионные связи с поверхностью шпинели. Средняя шероховатость поверхности подложек (определялась путем усреднения по нескольким сканам 50x50 мкм) составляет  $R_a = 5,07$  нм. Участки поверхности, свободные от частиц абразива, (рис. 1 в и г) показывают высокое качество обработки ( $R_a \sim 0,2$  нм). Таким образом, подтверждается перспективность использования УДА в качестве абразивного материала при финишной полировке поверхности шпинели. Однако необходимо решить проблему очистки обработанной поверхности от остатков абразива.

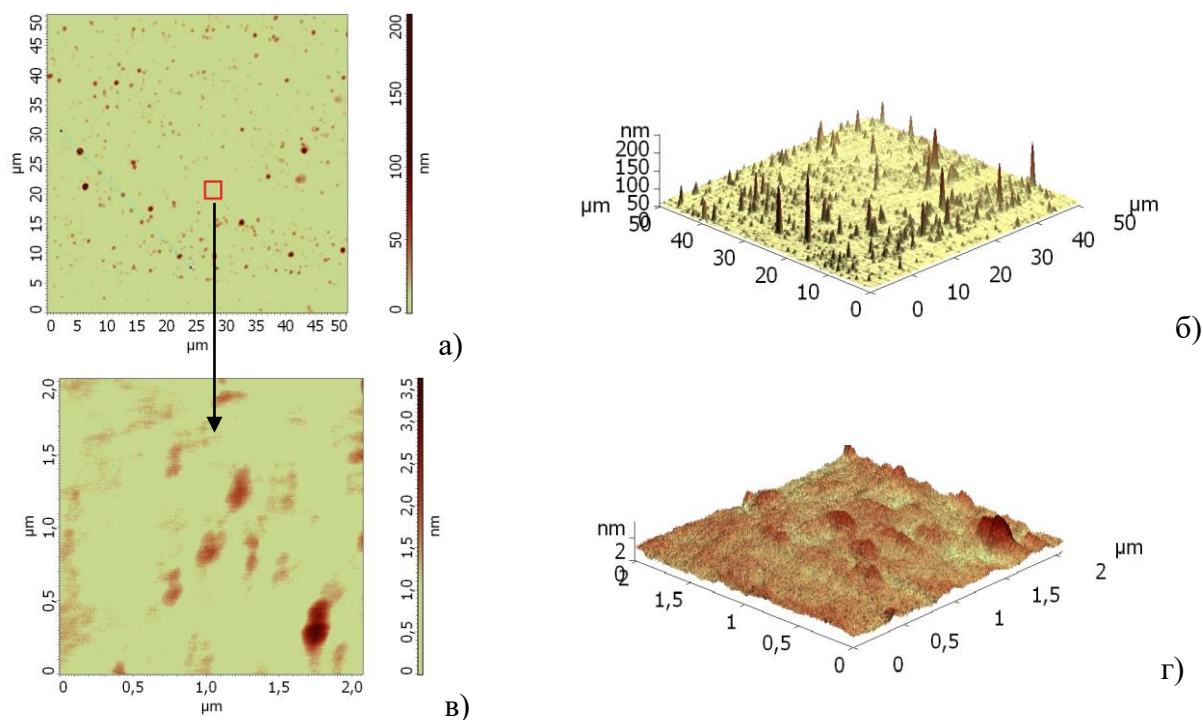


Рисунок 1 – Морфология поверхности подложек из шпинели после финишной полировки с использованием УДА.

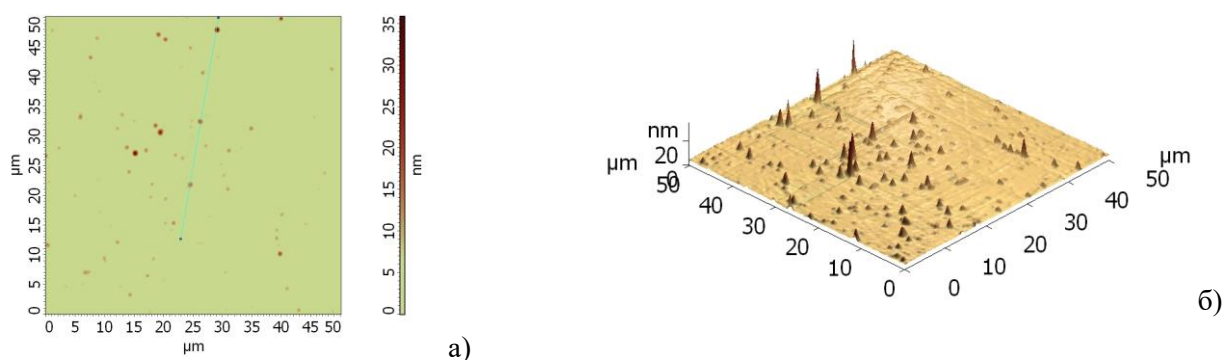


Рисунок 2 – Морфология поверхности подложек из шпинели после финишной полировки с использованием УДА и отжига на воздухе при  $T = 500$  °C

Для очистки поверхности от частиц абразива было предложено провести дополнительную термообработку образцов на воздухе при  $T \geq 500$  °C. Известно [11], что при этих температурах частицы УДА начинают активно окисляться кислородом воздуха и полностью сгорают. Шпинель же является стабильным оксидом, и термообработка на воздухе не должна приводить к изменению ее химического состава. Однако необходимо учитывать, что нагревание шпинели до 900 °C приводит к неупорядоченному распределению атомов Mg и Al [12]. В нашем эксперименте подложка после финишной полировки отжигалась на воздухе при  $T = 500$  °C в течение 2-х часов. После 1 часа отжига образец был перевернут. После отжига под-

ложка подвергалась ультразвуковой обработке в ацетоне в течение 1 часа, а затем промывалась деионизованной водой.

Дополнительная обработка дала положительный результат (рисунок 2). Количество частиц на поверхности заметно уменьшилось. Уменьшился и их размер с 20-160 нм до 5-25 нм. В результате средняя шероховатость поверхности образца уменьшилась на порядок с 5,07 до 0,49 нм. Следует, однако, отметить, что на поверхности остались частицы абразива. Возможно, следует увеличить длительность и/или температуру термообработки.

Из описанных выше экспериментальных данных следует, что путем финишной виброполировки подложек с использованием УДА в качестве абразивного материала возможно добиться существенного улучшения качества обработки поверхности шпинели и получать подложки с уровнем шероховатости поверхности  $R_a \leq 1$  нм.

#### Список литературы

1. J. R. Bashe and D. L. Hibbard, "Observations during the fabrication of spinel optics." Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1–12, 7302 (2009).
2. I. Ganesh, "A review on magnesium aluminate ( $MgAl_2O_4$ ) spinel: synthesis, processing and applications." Int. Mater. Rev., 63–112, 58 (2013).
3. Z. Shi, Q. Zhao, B. Guo, T. Ji, and H. Wang, "A review on processing polycrystalline magnesium aluminate spinel ( $MgAl_2O_4$ ): Sintering techniques, material properties and machinability." Mater. Des., 1–4, 193 (2020).
4. Y. Xiaobin, X. Min, D. Wenhao, and C. Chong, "Effect of cutting edge radius on surface roughness in diamond tool turning of transparent  $MgAl_2O_4$  spinel ceramic." Opt. Mater., 129–135, 71 (2017).
5. F. Klocke, O. Dambon, T. Bletek, T. Hoeche, F. Naumann, and T. Hutzler, "Surface integrity in ultra-precision grinding of transparent ceramics." 4th Cirp Conference on Surface Integrity, 177–180 (2018).
6. Zhankui Wang, Minghua Pang<sup>1</sup>, Jianxiu Su, Jianguo Yao Effect of Different Abrasives on Chemical Mechanical Polishing for Magnesia Alumina Spinel Key Engineering Materials 2020 Vol. 866, pp 115-124
7. Z. Shi, B. Guo, Q. Zhao, and T. Ji, "A study on micro-machining spinel by applying ordinary cutting and ultra-sonic elliptical vibration cutting." Int. J. Adv. Manuf. Technol., 1677–1692, 104 (2019).
8. J. Qiao, G. Wang, S. Chen, and G. Tie, "Design on high-current pulsed electron beam modification and analysis of machining characteristics for spinel." Aopc 2017: Optical Sensing and Imaging Technology and Applications, 1–7, 10462 (2017).
9. Daicheng Qin, Chao Wang, Minheng Ye, Hui Dong, Shuke Huang, Xiaoyuan Li, Fang Ji, Pinkuan Liu. Sulfuric Acid Etching for Surface Modification and Improved Polishing of Magnesium Aluminate Spinel ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2021 10 084001
10. <http://sinta.biz/nanoalmazy>
11. S. Osswald, G. Yushin, V. Mochalin, S.O. Kucheyev, Y. Gogotsi. Control of sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> carbon ratio and surface chemistry of nanodiamond powders by selective oxidation in air. J. Am. Chem. Soc., 128 (2006) 11635–11642.
12. Чухров Ф. В., Бонштедт-Куплетская Э. М. Минералы. Справочник. Выпуск 3. Сложные окислы, титанаты, ниобаты, танталаты, антимонаты, гидроокислы. — Москва: Наука, 1967. — 676 с.

УДК 537.312.5

Жданович Д. Н.<sup>1</sup>, Ластовский С. Б.<sup>1</sup>, Макаренко Л. Ф.<sup>2</sup>, Маркевич В. П.<sup>3</sup>, Огородников Д. А.<sup>1</sup>

## ОТЖИГ ПОД ОБРАТНЫМ СМЕЩЕНИЕМ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДНЫХ $n^+$ - $p$ -СТРУКТУР, ОБЛУЧЕННЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

<sup>1</sup> Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>3</sup> Университет г. Манчестер, Англия

Исследованы изменения в профилях концентрации подвижных носителей заряда в базе кремниевых  $n^+$ - $p$ -структур, вызванные облучением альфа-частицами и последующим отжигом при приложении обратного смещения и без смещения. Показано, что в процессе облучения обратно смещенных  $n^+$ - $p$ -структур при температуре 290 К генерируемые междоузельные атомы кремния,  $Si_i^{2+}$ , отжигаются ускоренно в области обеднения при захвате электронов, создаваемых альфа-частицами.

**Введение.** В работах [1-2] исследовалась эффективность введения радиационных дефектов (РД) при облучении альфа-частицами кремниевых  $n^+$ - $p$ -структур, находящихся под обратным смещением и без смещения. Авторы [1-2] наблюдали уменьшение эффективности введения РД в области пространственного заряда (ОПЗ) по сравнению с квази-нейтральной  $p$ -областью, в результате чего на профиле концентрации дырок ( $p$ ) возникал участок резкого (немонотонного) изменения  $p$ . Последующая инжекция электронов в базу  $n^+$ - $p$ -структур приводила к исчезновению участка немонотонности распределения  $p$  в ОПЗ и остальной части базы. Инжекционно-зависимым дефектом считается собственный междоузельный атом кремния в двукратно положительном зарядовом состоянии  $Si_i^{2+}$  [3]. Атомы  $Si_i^{2+}$  эффективно захватывают инжектируемые электроны, мигрируют по решетке в результате рекомбинационно-ускоренной диффузии и исчезают при взаимодействии с другими дефектами [3, 4].

Величина обратного тока  $n^+$ - $p$ -структур определяется электронами и дырками, генерируемыми в ОПЗ в результате термической ионизации, а также электронами, диффундирующими в ОПЗ из квази-нейтральной  $p$ -области. В процессе облучения обратно-смещенных  $n^+$ - $p$ -структур альфа-частицами добавляется ионизационная составляющая тока. Важность имеет выяснение основной компоненты обратного тока, влияющей на инжекционный отжиг атомов  $Si_i^{2+}$  в ОПЗ облучаемых образцов. Цель работы – исследование влияния отжигов под обратным смещением на профили концентрации дырок и концентрации радиационных дефектов в  $p$ -области кремниевых  $n^+$ - $p$ -структур, предварительно облученных альфа-частицами без смещения.

**Методика эксперимента.** Исследовались некорпусированные диодные  $n^+$ - $p$ -структуры, изготовленные на пластинах кремния с эпитаксиальным слоем, легированным бором ( $\rho \sim 18$  Ом·см) толщиной 33 мкм (подложка КДБ-0,005).  $P$ - $n$ -переход формировался имплантацией фосфора в  $p$ -базу с последующим отжигом при 1420 К в атмосфере азота и кислорода. Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла 9 мкм, площадь -  $6,25 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>. В качестве омических контактов напылялся слой алюминия толщиной 1÷2 мкм. Для эксперимента отбирались  $n^+$ - $p$ -структуры с величиной обратных токов не более 30 нА при обратном напряжении  $U_{см} = -40$  В.

Измерялись спектры DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy)  $n^+$ - $p$ -структур в диапазоне температур 80÷300 К в режиме заполнения ловушек дырками при значении окна скоростей эмиссии  $19$  с<sup>-1</sup> и длительности импульса заполнения 0,01 с. Сканировались две области пространственного заряда при значениях напряжений смещения  $U_{см} = -6$  и  $-16$  В и напряжений заполнения  $U_{зап} = -2$  и  $-10$  В, соответственно.

Облучение  $n^+$ - $p$ -структур осуществлялось при комнатной температуре (~290 К) альфа-частицами с энергией ~5 МэВ в течение 300 мин. (флюенсом  $\sim 6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>). Одна группа образцов облучалась без обратного смещения, а вторая (для сравнения результатов) – при  $U_{см} = -10$  и  $-20$  В. Для эксперимента отбирались  $n^+$ - $p$ -структуры с одной и той же пластины.

Распределение концентрации носителей заряда  $p(x)$  в базовой  $p$ -области структур определялось из анализа вольт-фарадных зависимостей. Барьерная емкость измерялась при комнатной температуре на частоте 1 МГц с помощью измерителя LCR E7-12 в диапазоне обратных смещений  $U_{см} = 0 \div -40$  В.

Отжиг облученных  $n^+$ - $p$ -структур проводился в криостате DLTS-спектрометра при значениях обратного смещения  $U_{см} = -10, -20$  и  $-40$  В. Температура отжига равнялась температуре облучения – 290 К.

**Экспериментальные результаты и обсуждение.** На рисунке 1а показаны профили концентрации подвижных носителей заряда  $p(x)$   $n^+$ - $p$ -структуры, до и после облучения альфа-частицами в течение 300 мин. без обратного смещения и последующих отжигов в течение 300 мин. при различных напряжениях обратного смещения. В результате введения облучением РД концентрация дырок по всей исследуемой глубине  $p$ -области уменьшается. Отжиг облученной  $n^+$ - $p$ -структуры при  $U_{см} = -10$  В незначительно повышает концентрацию дырок  $p$ , что особенно заметно при  $x = 1,4 \div 4,5$  мкм. Повторный отжиг этой же  $n^+$ - $p$ -структуры в течение 300 мин. при  $U_{см} = -20$  В расширяет диапазон изменений  $p$  до  $x \sim 5,7$  мкм. Выдержка образца под обратным смещением  $U_{см} = -40$  В практически не влияет на вид зависимости  $p(x)$ .

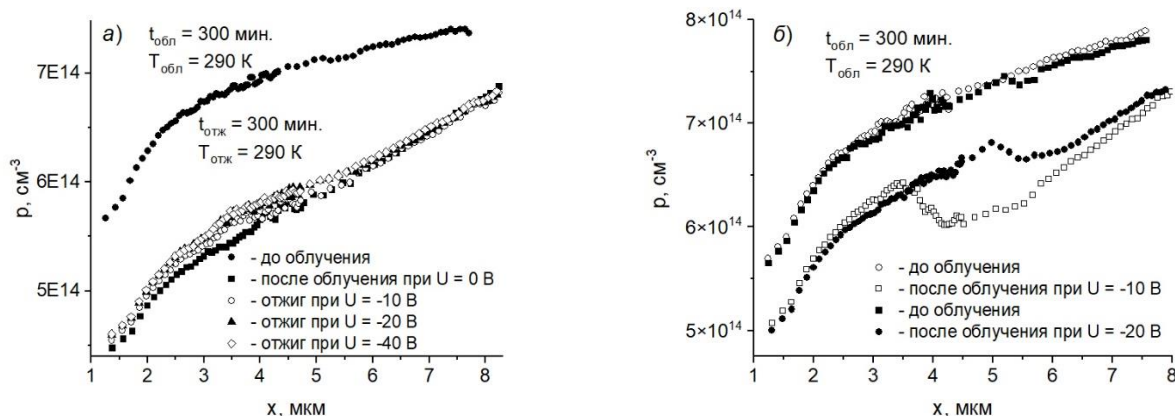


Рисунок 1 – Профили концентрации дырок  $p$ -области  $n^+$ - $p$ -структур до и после облучения альфа-частицами без обратного смещения и отжига(а), и структур, облученных при различных значениях обратного смещения (б)

На рисунке 1б показаны для сравнения зависимости  $p(x)$   $n^+$ - $p$ -структур, до и после облучения альфа-частицами при температуре 290 К в течение 300 мин. при обратных смещениях  $U_{см} = -10$  и  $-20$  В. Из полученных результатов видно, что на кривой  $p(x)$   $n^+$ - $p$ -структуры, облучаемой под обратным смещением  $U_{см} = -10$  В, возникает участок немонотонности при  $x = 3,5 \div 4,2$  мкм. Моделированием в программном модуле Atlas комплекса Silvaco установлено, что значение  $x \sim 4$  мкм соответствует границе ОПЗ в  $p$ -области  $n^+$ - $p$ -структур при  $U_{см} = -10$  В.

С увеличением обратного смещения до  $U_{см} = -20$  В участок немонотонности на зависимостях  $p(x)$  облученных образцов смещается в глубь  $p$ -области на расстояние  $x = 5,0 \div 5,5$  мкм (рис. 1б). Этим значениям  $x$  также соответствует толщина ОПЗ  $n^+$ - $p$ -структур при обратном смещении  $U_{см} = -20$  В.

Сравним результаты, представленные на рисунках 1а и б. Отжиги под обратным смещением облученных образцов приводят к восстановлению концентрации дырок в ОПЗ  $n^+$ - $p$ -структур в меньшей степени, чем у образцов, облученных под смещением. Следовательно, инжекционный отжиг междоузельных атомов  $Si_i^{2+}$  в ОПЗ исследуемых кремниевых  $n^+$ - $p$ -структур в процессе облучения под обратным смещением преимущественно протекает в результате захвата электронов, генерируемых альфа-частицами.

На рисунке 2 показаны спектры того же образца, что и на рисунке 1а, после облучения и отжига в течение 300 мин. при  $U_{см} = -10$  В. Сканировались два участка  $p$ -области при

$U_{см} = -6$  и  $U_{зап} = -2$  В (рисунок 2а) и при  $U_{см} = -16$  и  $U_{зап} = -10$  В (б). Первый соответствовал области пространственного заряда при отжиге, второй – квази-нейтральной части  $p$ -области.

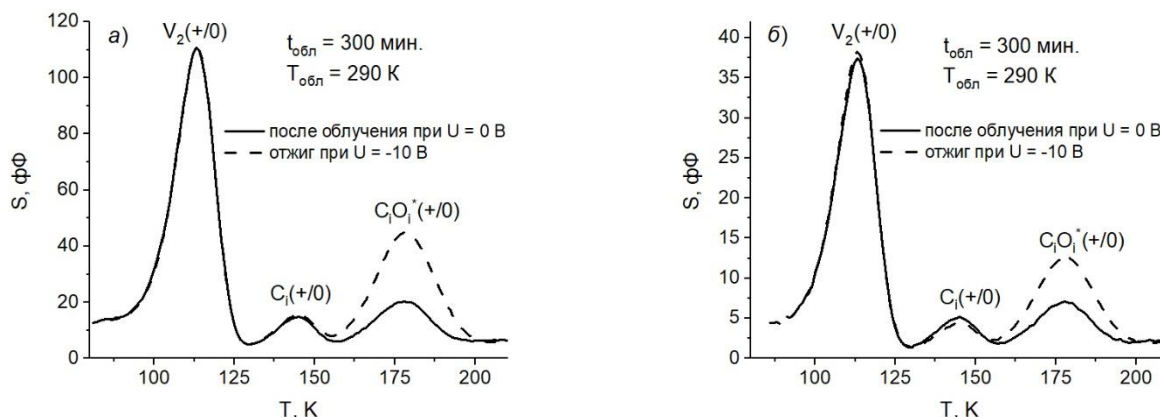


Рисунок 2 – DLTS-спектры  $n^+$ - $p$ -структуры после облучения альфа-частицами без обратного смещения и отжига при значении обратного смещения  $U_{см} = -10$  В.

Режимы измерения спектров:  $U_{см} = -6$  и  $U_{зап} = -2$  В (а),  $U_{см} = -16$  и  $U_{зап} = -10$  В (б)

Максимумы на спектрах связаны с эмиссией дырок с глубоких уровней РД в нижней половине запрещенной зоны кремния. Соответствующий каждому DLTS-пику тип РД (дивакансия  $V_2$ , междуузельный углерод  $C_i$  и междуузельный углерод – междуузельный кислород  $C_iO_i$ ) указан на рисунках. Сразу после облучения наблюдаются весьма незначительные по амплитуде пики  $C_i$  и  $C_iO_i$ . После отжига при  $U_{см} = -10$  В увеличилась главным образом концентрация комплексов  $C_iO_i$  во всей  $p$ -области. В ОПЗ до отжига амплитуды пиков  $C_i$  и  $C_iO_i$  суммарно составляли 35, а после – 60 нФ, т.е. суммарная концентрация этих дефектов возросла в 1,7 раза (рисунок 2а). Аналогичная оценка для нейтральной части  $p$ -области показывает (рисунок 2б), что суммарная концентрация  $C_i$  и  $C_iO_i$  возросла в 1,4 раза.

Концентрации дефектов  $C_i$  и  $C_iO_i$  увеличиваются в результате вытеснения атомами  $Si_i^+$  атомов замещения углерода в междуузельное положение. Следовательно, при отжиге обратно-смещенных  $n^+$ - $p$ -структур атомы  $Si_i^{2+}$  захватывают электроны в большей степени в ОПЗ.

**Заключение.** Исследовано влияние отжигов при 290 К на профиль концентрации подвижных носителей заряда в  $p$ -области обратно смещенных кремниевых  $n^+$ - $p$ -структур, предварительно облученных альфа-частицами без смещения. Показано, в процессе облучения при температуре 290 К обратно смещенных  $n^+$ - $p$ -структур генерируемые междуузельные атомы  $Si_i^{2+}$  ускоренно отжигаются в ОПЗ, захватывая электроны, создаваемые альфа-частицами. В результате этого процесса скорость удаления дырок в ОПЗ меньше, чем в нейтральной  $p$ -области.

#### Список литературы

1. Кучинский, П. В. Инжекционный отжиг радиационных дефектов в  $p$ -кремнии, вводимых в электрическом поле при 78÷330 К / П. В. Кучинский, В. М. Ломако, А. П. Петрунин // ФТП. - 1986. – Т. 20, № 4. – С. 740-742.
2. Aharodnikau, D. A. The role of Si self-interstitial atoms in the formation of electrically active defects in reverse-biased silicon  $n^+$ - $p$  diodes upon irradiation with alpha particles / D. A. Aharodnikau [et al.] / Physica Status Solidi A. – 2021. – 218. – 2100104 (7).
3. Makarenko, L. F. Kinetics of self-interstitials reactions in  $p$ -type silicon irradiated with alpha particles / L. F. Makarenko [et al.] // Physica B. – 2012. – 407. – P. 3016–3019.
4. Makarenko, L. F. Effect of electron injection on defect reactions in irradiated silicon containing boron, carbon, and oxygen / L. F. Makarenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2018. – 123. – 161576 (7).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ФОРМУ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Представлены результаты моделирования процессов переноса электронов в короткоканальном кремниевом МОП-транзисторе с плавающим затвором, являющимся базовым элементом флеш-памяти. Изучено влияние напряжения на стоке на форму потенциального барьера туннельного оксида, определяющего уровень паразитного туннельного тока в такого рода элементах. Рассчитаны зависимости отношения паразитного туннельного тока к току стока от координаты вдоль проводящего канала транзистора.

Дальнейший прогресс в проектировании и производстве микросхем флеш-памяти приводит к значительному уменьшению областей протекания электрического тока в кремниевых МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом данных микросхем [1]. Это сопровождается резким возрастанием величин паразитных токов утечки, которые в конечном счете могут привести к искажению хранящейся в элементах флеш-памяти информации (см., например, [2, 3]). Очевидно, что при разработке перспективных устройств на основе флеш-технологий необходимо не допускать условий для возникновения высоких уровней паразитных токов.

На рисунке 1 приведена энергетическая диаграмма элемента флеш-памяти в режиме отсутствия заряда на плавающем затворе при подаче рабочего напряжения  $V_G$  на затвор короткоканального МОП-транзистора и отсутствии напряжения на стоке ( $V_D = 0$ ). В этом случае в  $p$ -подложке данного транзистора возникнет инверсионный слой (проводящий канал) вследствие появления падения напряжения  $V_{Si}$  ( $V_{Si} + V_{тун} \approx 0.5 V_G$ ).

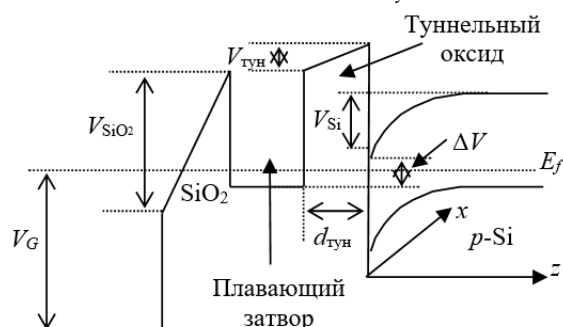


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма элемента флеш-памяти при  $+V_G$  и  $V_D = 0$

На рисунке 2 приведена энергетическая диаграмма того же элемента, возникающая в режиме считывания, хранящегося на элементе флеш-памяти бита информации. Данный режим включается при подаче на затвор и на сток МОП-транзистора рабочих напряжений  $V_G$  и  $V_D$ , соответственно. В этом случае в проводящем канала потечет электрический ток, уровень которого укажет на соответствующее значение бита информации, хранящегося на плавающем затворе.

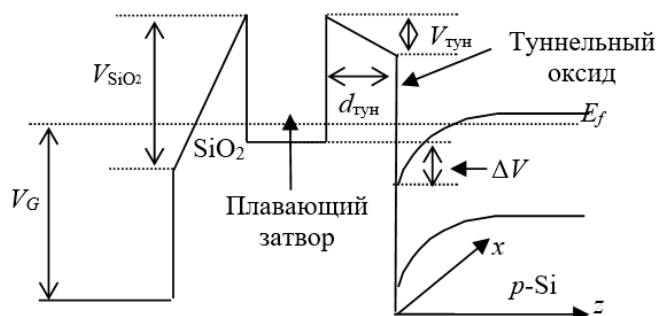


Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма элемента флеш-памяти при  $+V_G$  и  $+V_D$

Паразитный туннельный ток возникает из инверсионного слоя в  $p$ -Si через туннельный оксид на плавающий затвор. На величину этого тока ключевое влияние оказывают четыре фактора: 1) толщина туннельного оксида  $d_{\text{тун}}$ , 2) величина падения напряжения в туннельном оксиде  $V_{\text{тун}}$ , 3) величина сдвига зон в плавающем затворе и  $p$ -Si МОП-транзистора  $\Delta V$ , 4) значение энергии  $E$  туннелирующих электронов в  $p$ -Si вблизи туннельного оксида.

Наиболее сильное влияние на паразитный туннельный ток электронов на плавающий затвор оказывает толщина туннельного оксида  $d_{\text{тун}}$ . Однако, так как она задаётся конструктивно, и в процессе эксплуатации не меняется, в настоящем докладе влияние  $d_{\text{тун}}$  на паразитный туннельный ток мы не рассматриваем. Нас интересует влияние напряжения на стоке, без которого чтение информации на элементе флеш-памяти невозможно. Данное напряжение, как видно из сравнения рисунок 1 и 2, заметно изменяет значения величин  $V_{\text{тун}}$  и  $\Delta V$ , в том числе, чаще всего, изменяя и их знак, т. е. направление среза вершины потенциального барьера туннельного оксида (знак  $V_{\text{тун}}$ ) и расположение дна зоны проводимости в подложке транзистора по отношению к дну зоны проводимости на плавающем затворе (знак  $\Delta V$  — положительное значение соответствует более высокому положению дна зоны проводимости подложки). Также напряжение на стоке способствует разогреву электронов в проводящем канале короткоканального МОП-транзистора при их дрейфе от истока к стоку, т. е. оказывает непосредственное влияние и на энергию электронов  $E$ . При этом вся сложность и неоднозначность влияния  $V_D$  заключается в том, что все эти три величины —  $V_{\text{тун}}$ ,  $\Delta V$  и  $E$  — под действием напряжения, подаваемого на сток, изменяются с изменением координаты  $x$  вдоль проводящего канала в направлении от истока к стоку. Увеличение  $V_{\text{тун}}$  (независимо от его знака, т. е. более крутая форма вершины потенциального барьера туннельного оксида) приводит к росту паразитного туннельного тока, точно также, как и увеличение энергии электронов  $E$ . Уменьшение  $\Delta V$ , особенно переход этой величины в область отрицательных значений (т. е. сильное понижение дна зоны проводимости в подложке), приводит к уменьшению паразитного туннельного тока. Следовательно, вдоль проводящего канала МОП-транзистора с плавающим затвором величина паразитного тока будет сложным образом изменяться. Очевидно, что при моделировании паразитного туннельного тока и вычислении его значений в элементах флеш-памяти необходимо точно рассчитывать зависимости  $V_{\text{тун}}(x)$ ,  $\Delta V(x)$  и  $E(x)$  для конкретно подаваемых на затвор и сток МОП-транзистора напряжений  $V_G$  и  $V_D$ .

В настоящей работе нами осуществлено моделирование изменения формы потенциального барьера туннельного оксида (т. е. рассчитаны  $V_{\text{тун}}(x)$ ,  $\Delta V(x)$  и  $E(x)$ ), а также рассчитаны зависимости величины паразитного туннельного тока вдоль проводящего канала для МОП-транзистора с плавающим затвором со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала  $L_{ch} = 0,2$  мкм, толщина подзатворного оксида  $d_{\text{окс}} = 7$  нм, толщина туннельного оксида  $d_{\text{тун}} = 2$  нм, толщина плавающего затвора  $d_{\text{плав}} = 2$  нм, концентрации донорной примеси в областях истока и стока  $N_D = 10^{26}$  м<sup>-3</sup> и акцепторной в подложке  $N_A = 10^{24}$  м<sup>-3</sup>. Алгоритмы и процедуры моделирования паразитного туннельного тока в рассматриваемых условиях, которые базируются на численном моделировании электронного переноса в канале МОП-транзистора методом Монте-Карло вместе с самосогласованным решением уравнения Пуассона, описаны в наших работах [4; 5]. Самосогласованное решение уравнения Пуассона позволяет точно рассчитать изменения вдоль канала значений  $V_{\text{тун}}$  и  $\Delta V$ , а численное моделирование процесса переноса электронов в канале транзистора позволяет рассчитать зависимости средней энергии электронов от координаты  $x$  вдоль канала.

На рисунках 3 и 4 приведены две из рассчитанных нами зависимостей вдоль проводящего канала МОП-транзистора с плавающим затвором — величины отклонения зоны проводимости подложки транзистора от дна зоны проводимости плавающего затвора  $\Delta V$  и отношения плотности туннельного паразитного тока к плотности тока стока  $J_{\text{тун}} / J_{\text{сток}}$ . Полученные зависимости показывают, что величина  $\Delta V$  приблизительно в середине проводящего канала меняет свой знак и вблизи стока приближается к значению, составляющему около  $-0.7 V_D$ .



Результаты расчета величины паразитного туннельного тока показывают, что в целом для рассматриваемых условий его значения крайне малы и медленно растут вдоль проводящего канала.

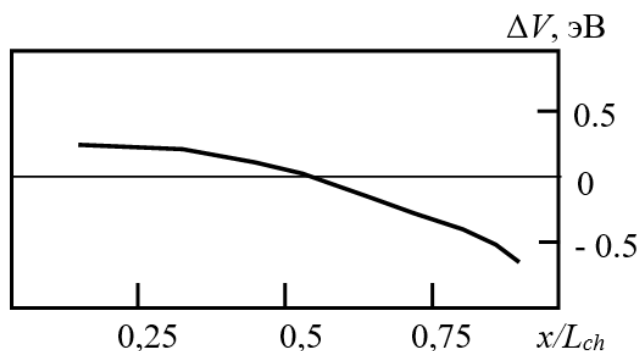


Рисунок 3 – Изменение энергетического сдвига дна зон для потенциального барьера туннельного оксида вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти при  $V_G = 2$  В и  $V_D = 2$  В.

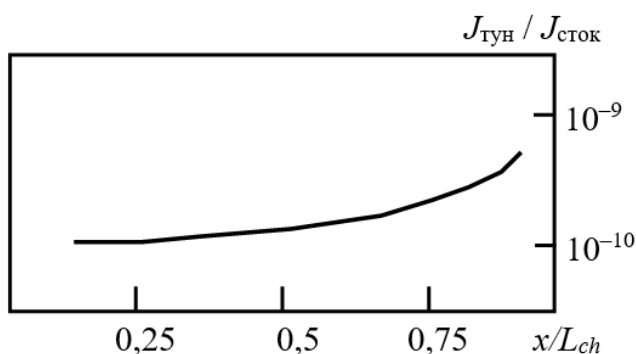


Рисунок 4 – Отношение плотности туннельного паразитного тока к плотности тока стока вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти при  $V_G = 2$  В и  $V_D = 2$  В.

Таким образом, в настоящей работе путем численного моделирования процессов переноса электронов в проводящем канале короткоканального кремниевого МОП-транзистора с плавающим затвором рассчитана форма потенциального барьера туннельного оксида и изучено влияние на нее стокового напряжения. Определено изменение уровня дна зоны проводимости подложки МОП-транзистора под действием стокового напряжения вдоль проводящего канала и получена зависимость вдоль данного канала отношения плотности туннельного паразитного тока к току стока для рабочих напряжений на затворе и стоке, равнявшимся 2 В.

#### Список литературы

1. Nonvolatile semiconductor memories: Technologies, design, and applications / Hu C. (ed.). – Piscataway, NJ: IEEE Press. – 1991. – 167 p.
2. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd. – 2009. – 256 p.
3. Ghetti, A. Low-voltage hot electrons and soft programming lifetime prediction in nonvolatile memory cells / A. Ghetti, L. Selmi, and R. Bez // IEEE Trans. Electron Devices. – 1999. – Vol. 46, No. 4. – P. 696–702.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование электрофизических параметров элементов флеш-памяти методом Монте-Карло / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В., Борздов, А. Н. Петлицкий // Приборы и методы измерений. – 2022. – Том. 13, № 4. – С. 208–212.
5. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов, О. Г. Жевняк, Ф. Ф. Комаров, В. О. Галенчик. – Минск : БГУ. – 2007. – 175 с.

УДК 539.216.2; 535.37

Живулько В. Д.<sup>1</sup>, Мудрый А. В.<sup>1</sup>, Бородавченко О. М.<sup>1</sup>,  
Павловский В. П.<sup>2</sup>, Луценко Е. В.<sup>2</sup>, Яблонский Г. П.<sup>2</sup>, Якушев М. В.<sup>3</sup>

## ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПОГЛОЩАЮЩИХ СЛОЕВ $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

<sup>1</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

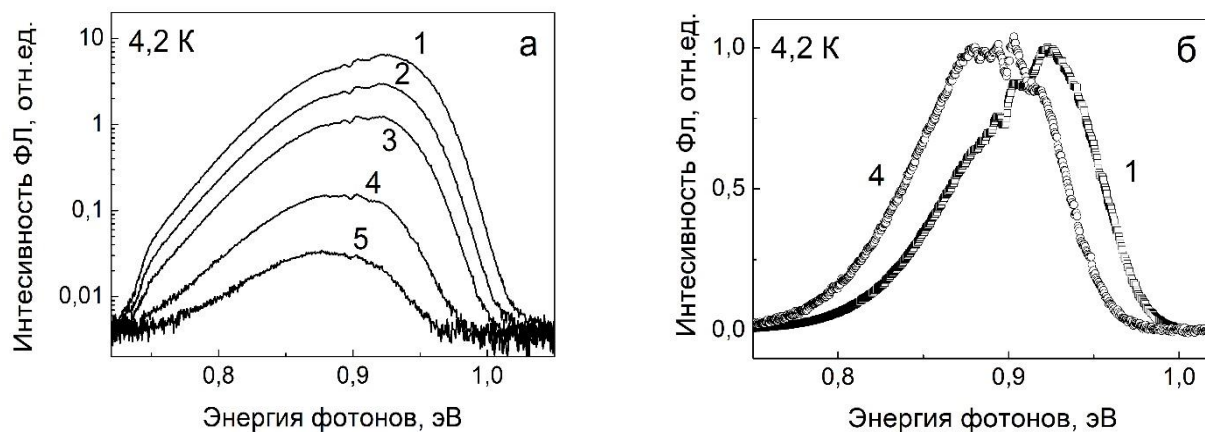
<sup>3</sup>Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Исследована зависимость спектров фотолюминесценции тонких поликристаллических пленок прямозонных полупроводников  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  от температуры в диапазоне 4,2 – 78 К и плотности мощности непрерывного лазерного возбуждения на длине волны 532 нм ( $0,06 - 4 \text{ Вт/см}^2$ ) и импульсного на длине волны 337,1 нм ( $1,4 - 17,4 \text{ кВт/см}^2$ ). Обсуждаются механизмы излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда в пленках соединений  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  со структурой кестерита.

Поликристаллические тонкие пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe) со структурой кестерита являются перспективным и востребованным полупроводниковым материалом для создания солнечных элементов [1]. В настоящее время достигнутый коэффициент полезного действия (к.п.д.) солнечных элементов, созданных на основе соединения CZTSe, составляет ~ 12,6 % [1]. Дальнейшее увеличение к.п.д. солнечных элементов может быть достигнуто при достоверном определении механизмов излучательной рекомбинации в этих прямозонных полупроводниках [2,3]. В настоящей работе приведены новые данные по определению оптических характеристик соединения CZTSe с использованием фотолюминесценции.

Исследования проводились на пленках CZTSe с толщиной ~ 2 мкм, сформированных на натрийсодержащих стеклянных подложках с предварительно осажденным контактным слоем Mo. Тонкие пленки CZTSe формировались с использованием метода магнетронного распыления металлических прекурсоров (Cu, Zn, Sn) и селенизации их наноразмерных слоев в диапазоне температур 300 – 550 °С [2]. Элементный состав тонких пленок CZTSe, определенный методом рентгеноспектрального локального микроанализа с энергетической дисперсией, показал дефицит меди по отношению к суммарному содержанию Zn и Sn на уровне  $[\text{Cu}]/([\text{Zn}]+[\text{Sn}]) \sim 0,83$ . Избыток цинка составил  $[\text{Zn}]/[\text{Sn}] \sim 1,17$ , а соотношение селена с металлами –  $[\text{Se}]/([\text{Cu}]+[\text{Zn}]+[\text{Sn}]) \sim 0,99$ . Измерение спектров фотолюминесценции (ФЛ) проводилось в диапазоне температур ~ 4,2 – 78 К по методикам, описанным ранее [4,5].

На рисунках 1а и 1б приведены ненормированные и нормированные спектры ФЛ, соответственно, зарегистрированные при температуре жидкого гелия  $T \sim 4,2 \text{ К}$  при возбуждении лазерным излучением на длине волны ~ 532 нм в диапазоне плотностей мощности возбуждения ~  $0,06 - 4 \text{ Вт/см}^2$ . Как видно, в спектрах ФЛ присутствует широкая полоса, которая смещается в область высоких энергий с 0,886 эВ до 0,923 эВ, ее интенсивность увеличивается, и полуширина уменьшается с 95 мэВ до 90 мэВ с повышением плотности мощности возбуждения, рисунок 1а. При этом низкоэнергетический контур полосы становится более пологим, а высокоэнергетический практически не изменяется, рисунок 1б. Такие оптические характеристики полосы позволяют отнести ее к излучательной рекомбинации электронов из зоны проводимости в «хвосты» акцепторных состояний вблизи валентной зоны [2]. Эксперименты показали, что зависимость интенсивности полосы ближкравой фотолюминесценции от плотности мощности лазерного излучения описывается выражением  $I = P^k$ , где коэффициент  $k \approx 1,0$ . Коэффициент  $j$ -shift, характеризующий высокоэнергетическое смещение полосы при изменении плотности мощности возбуждения на порядок лазерного излучения, составил  $j \approx 15 \text{ мэВ}$ , что указывает на сильное влияние флуктуаций потенциала в кристаллической решетке CZTSe на энергетические уровни дефектов структуры, ответственных за появление

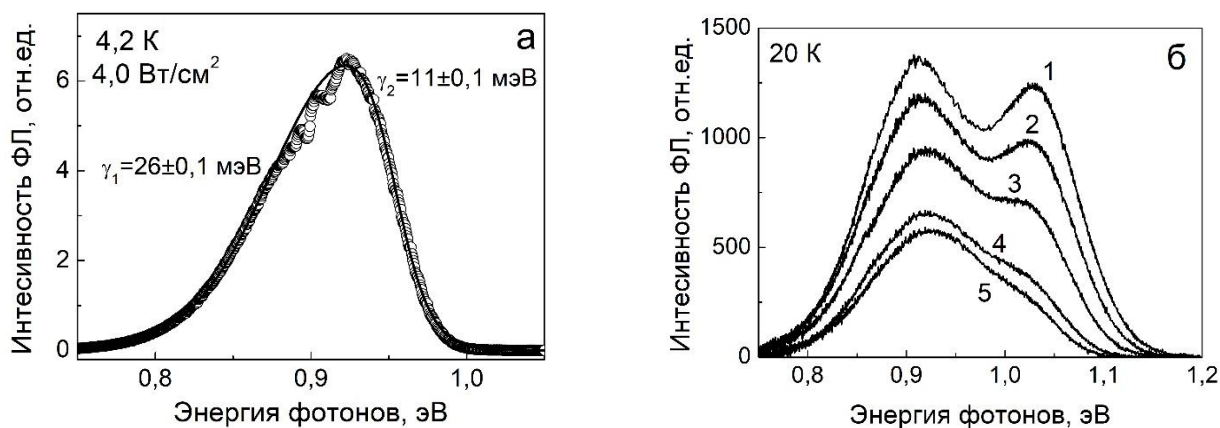


1 – 4,0 Вт/см<sup>2</sup>; 2 – 1,59 Вт/см<sup>2</sup>; 3 – 0,62 Вт/см<sup>2</sup>; 4 – 0,23 Вт/см<sup>2</sup>; 5 – 0,06 Вт/см<sup>2</sup>

Рисунок 1 – Зависимость спектров фотолюминесценции тонкой пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  от плотности мощности лазерного излучения

в спектрах полосы ФЛ. Такой механизм излучательной рекомбинации характерен для сильно легированных и сильно компенсированных прямозонных полупроводников  $p$ -типа проводимости [6]. Образование высокой концентрации собственных дефектов структуры акцепторного и донорного типа обусловлено отклонением состава соединения CZTSe от идеальной стехиометрии при осаждении тонких пленок.

На рисунке 2а приведены полоса ФЛ и подгоночная кривая обработки ее контура по формулам, приведенным в Таблице 1 [3,5,6]. Данные Таблицы указывают на изменение численных значений коэффициентов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\gamma$  при увеличении плотности мощности непрерывного лазерного излучения и перераспределении каналов излучательной рекомбинации носителей заряда. На рисунке 2б приведены спектры ФЛ, зарегистрированные при возбуждении импульсным лазером с длиной волны  $\sim 337$  нм в диапазоне плотности мощности  $\sim 1,4 - 17,4$  кВт/см<sup>2</sup> (длительность импульса  $\tau_{\text{имп}} = 8$  нс, частота повторения импульсов  $f = 525$  Гц). При плотности мощности 1,4 кВт/см<sup>2</sup> спектральное положение полосы ФЛ составляет  $\sim 0,925$  эВ, а при 17,4 кВт/см<sup>2</sup>  $\sim 0,914$  эВ.



1 – 1,4 кВт/см<sup>2</sup>; 2 – 2,9 кВт/см<sup>2</sup>; 3 – 5,8 кВт/см<sup>2</sup>; 4 – 11,6 кВт/см<sup>2</sup>; 5 – 17,4 кВт/см<sup>2</sup>

Рисунок 2 – Спектр фотолюминесценции и математическая обработка его контура для пленки  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  при плотности мощности возбуждения 4 Вт/см<sup>2</sup> (а).

Зависимость спектров фотолюминесценции от плотности мощности при возбуждении импульсным лазером 337 нм (б)

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Таблица 1 – Параметры  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , характеризующие наклоны низкоэнергетического и высокоэнергетического контуров полосы фотолюминесценции, соответственно. Параметр  $\gamma$  характеризует среднюю глубину флуктуаций потенциала при различных уровнях лазерного возбуждения в соответствии с формулами [3,5,6].

P, Вт/см <sup>2</sup>	$I(h\nu) \approx A \left[ 1 + \exp\left(-\frac{(h\nu - E_1)}{\gamma_1}\right) \right]^{-1} * \left( 1 - \left[ 1 + \exp\left(-\frac{(h\nu - E_2)}{\gamma_2}\right) \right]^{-1} \right)$		$I(h\nu) \approx \exp\left[-\frac{(h\nu - E_0)^2}{2\gamma^2}\right]$
	$\gamma_1$ , мэВ	$\gamma_2$ , мэВ	$\gamma$ , мэВ
4,0	26 ± 0,1	11 ± 0,1	56 ± 0,2
1,59	26 ± 0,1	11 ± 0,1	56 ± 0,2
0,62	25 ± 0,1	11 ± 0,1	55 ± 0,2
0,23	24 ± 0,1	12 ± 0,1	53 ± 0,2
0,06	22 ± 0,3	12 ± 0,2	48 ± 0,4

Эти данные указывают на то, что не только флуктуации потенциала «хвостов» энергетических зон или локализованных энергетических уровней играют определяющую роль, но и уровень возбуждения значительно изменяет механизмы излучательной рекомбинации даже при криогенных температурах в соответствии с теорией [6], в отличие от данных работы [3]. Наиболее важным результатом данной работы является обнаружение высокоэнергетической полосы ~ 1,03 эВ, относящейся к близкраевой межзонной излучательной рекомбинации, при импульсном лазерном излучении, рисунок 2б. Это указывает на возможность определения ширины запрещенной зоны  $E_g$  тонких пленок CZTSe в широком диапазоне температур ~ 4,2 – 300 К с использованием более интенсивного импульсного лазерного излучения.

Работа выполнена по проекту ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения», задание 1.4.4.

#### Список литературы

1. Solar cell efficiency tables (version 57) / M. Green [et al.] // Prog. Photovolt: Res. Appl. – 2020. – Vol. 29, Iss. 1. – P. 3–15.
2. Radiative recombination in Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> thin films with Cu deficiency and Zn excess / M. V. Yakushev [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2016. – Vol.48. – P. 475109-1–475109-7.
3. Photoluminescence studies in epitaxial CSTSe thin films / J. Sandler [et al.] // J. Appl. Phys. – 2016. – Vol. 120. – P. 125701-1–125701-7.
4. Photoluminescence, stimulated and laser emission in CuInSe<sub>2</sub> crystals / I. E. Svitsiankou [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2021. – Vol. 118. – P. 212103-1–212103-5.
5. Radiative recombination at ion-induced defects in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> alloy thin films / O. M. Borodavchenko // Semiconductors. – 2021. – Vol. 55, №. 2. – P. 168–174.
6. Леванюк, А. П. Краевая люминесценция прямозонных полупроводников / А. П. Леванюк, В. В. Осипов // УФН. – 1981. – Том 133, Вып. 3. – С. 427–477.

УДК 621.382

Пилипенко В. А.<sup>1,2</sup>, Ковальчук Н. С.<sup>1</sup>, Жигулин Д. В.<sup>1</sup>, Шестовский Д. В.<sup>1</sup>,  
Анищик В. М.<sup>2</sup>, Понарядов В. В.<sup>2</sup>

## ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА АЛЮМИНИЙ – ПОЛИКРЕМНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЛИТЕЛЬНОГО И БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГОВ

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования влияния длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий – поликремний на структурах алюминий – поликремний – двуокись кремния с целью изучения формирования омических контактов в элементной базе интегральных микросхем. Установлено, что при стандартной термообработке (450 °С, 20 мин в среде N<sub>2</sub>) происходит полное растворение поликремния в алюминии с последующей его сегрегацией в виде отдельных агломератов на поверхности двуокиси кремния. При быстрой термообработке (450 °С, 7 с в среде Ar) такого явления не наблюдается. Таким образом, при формировании омического контакта алюминий-поликремний на этапе производства интегральных микросхем целесообразно использовать быструю термическую обработку, которая существенно уменьшает растворение поликремния в алюминии и тем самым способствует формированию омического контакта.

При все усиливающей тенденции к повышению плотности компоновки современных интегральных микросхем (ИМС), все большее значение приобретает снижение тепловой нагрузки, оказываемой на полупроводниковую пластину в процессе формирования на ней элементной базы ИМС. Это приводит к необходимости разработки новых технологических процессов, использующие либо более низкие температуры, либо более короткое время их проведения. Такая тенденция обусловлена необходимостью значительного уменьшения диффузионных процессов, имеющих место при высокотемпературных обработках, а также практически исключить загрязнение полупроводникового материала неконтролируемыми примесями. Особенно остро этот вопрос стоит при формировании омических контактов к кремнию и поликремнию. Процесс создания контактов представляет собой осаждения алюминия на кремний и поликремний с последующим применением длительной термической обработки (510 °С, 10 мин или 450 °С, 20 мин для кремния [1]). При этом возникает процесс взаимного диффузионного перераспределения как металла в кремнии, так и кремния в металле, который усиливается при длительной термической обработке, что приводит к значительному ухудшению параметров создаваемых ИМС, а, следовательно, к снижению процента выхода годных изделий [2-3].

Один из методов, снижающих диффузионные процессы при высокотемпературных обработках, в том числе при формировании омических контактов, - применение быстрых термических обработок [4-8]. Однако в этих публикациях описывается лишь взаимодействие алюминиевой металлизации с монокристаллическим кремнием, при этом не затрагиваются вопросы по формированию такого контакта с поликремнием в процессе создании элементной базы ИМС. Проведение таких исследований позволит установить особенности формирования омических контактов не только к поликремниевым резисторам и конденсаторам, но и к поликремниевым затворам полевых транзисторов, что непременно скажется на их выходных характеристиках, а, значит, и на работоспособности всей ИМС.

На кремниевых пластинах КДБ 10 диаметром 100 мм и ориентацией <111> пироженным окислением при температуре 850 °С формировался окисел кремния толщиной 73 нм. Затем на окиселе кремния методом газофазного осаждения формировался поликремний (ПКК) толщиной 0,25 мкм на поверхность которого магнетронным методом напылялась пленка алюминия (с 1 % примеси кремния) толщиной 1,5 мкм. Часть полученных структур Al-ПКК-SiO<sub>2</sub> была подвергнута различным термообработкам: стандартной термической обработке, используемой при вжигании контактов ИМС (450 °С, 20 мин в среде N<sub>2</sub>) и быстрой термической обработке (БТО) (450 °С, 7 с в среде Ar). Другая часть не подвергалась воздействию

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

температуры. Процесс БТО пластин выполнялся в стационарной атмосфере Ar при атмосферном давлении системой УБТО ПИТ1801. Инертная атмосфера Ar была выбрана с целью исключения процессов окисления алюминия при термообработке в естественных атмосферных условиях. Пластины облучались с непланарной стороны потоками фотонов 20 галогенных ламп импульсами постоянной мощности длительностью 7 с. Мощность излучения ламп обеспечивала достижение температуры нагрева пластины 450 °С в течение 7 с.

Исследование границы раздела Al-ПКК и определение элементного состава осуществлялось на сколе пластины с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 фирмы Hitachi (Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax 200 фирмы Bruker (Германия).

Влияние длительной и быстрой термообработки на формирование границы раздела Al-ПКК показано на рисунке 1.

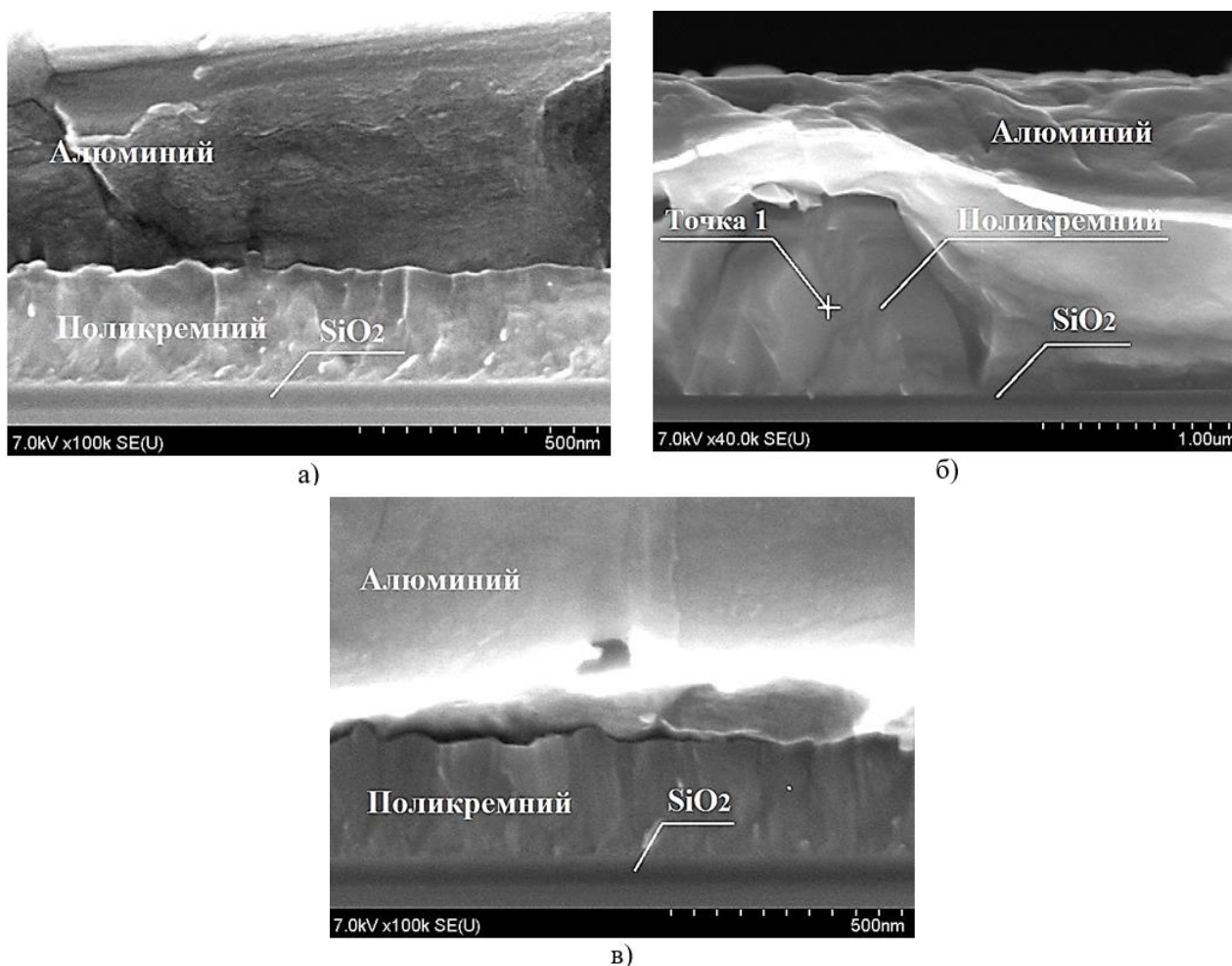


Рисунок 1 – РЭМ-фото структуры Al-ПКК-SiO<sub>2</sub>  
а - без термической обработки; б - после длительной термической обработки 450 °С, 20 мин, N<sub>2</sub>;  
в – после БТО 450 °С, 7 с, Ar

Анализ полученных данных показал, что имеется значительная разница между длительной термической обработкой (450 °С, 20 мин, N<sub>2</sub>) и БТО (450 °С, 7 с, Ar). При длительной термической обработки происходит полное растворение ПКК в алюминии с последующей его сегрегацией в виде отдельных агломератов ПКК на поверхности двуокиси кремния. Элементный состав данных агломератов приведен на рисунке 2.

Высота таких агломератов может значительно превышать толщину напыленной пленки алюминия. Поскольку алюминий гораздо более мягкий материал по сравнению с ПКК, то своими острыми углами ПКК легко протыкает пленку алюминия насквозь, что может привести к короткам с соседними топологическими слоями ИМС, а, значит, и к их полному отказу.

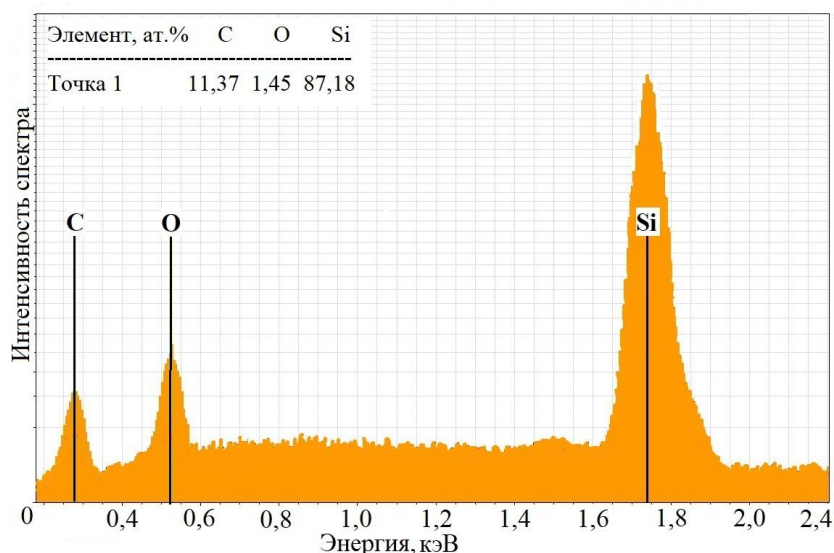


Рисунок 2 – Энергодисперсионный спектр ПКК агломерата (рисунок 1б, точка 1)

С уменьшением проектных норм изготовления ИМС все большее значение приобретают диффузионные процессы на границах раздела топологических слоев. Так, в месте соприкосновения омического алюминиевого контакта к ПКК затворам МОП-транзисторов, резисторов, конденсаторов происходит растворение ПКК в алюминии с последующим его сегрегацией в виде отдельных остроугольных ПКК агломератов, которые не только ухудшают выходные характеристики ИМС, но и приводят к их полному отказу путем закорачивания соседних топологических слоев. Одним из способов уменьшения диффузионных процессов в микроэлектронике является замена термического отжига на БТО, позволяющее избежать разрушения омических алюминиевых контактов к ПКК топологическим элементам, а значит, и увеличить процент выхода годных ИМС.

#### Список литературы

1. Пилипенко В. А. Быстрые обработки в технологии СБИС. Минск: Издательский центр БГУ, 2004.
2. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Под ред. Поута Дж., Ту К., Мейера Дж. М.: Мир, 1982. С. 576.
3. Технология СБИС. Т.2 / Под ред. Зи С. М. М.: Мир, 1986.
4. Агеев О. А., Беляев А. Е., Болтовец Н.С. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / Харьков: НТК Институт монокристаллов, 2008.
5. Анищик В. М., Горушко В. А., Пилипенко В. А. Физические основы быстрой термообработки. Создание многоуровневой металлизации / Минск: БГУ, 2000.
6. Буйко Л. Д., Лесникова В. П., Пилипенко В. А. Особенности взаимодействия системы Al-Si при термической и импульсной оптической обработках / Электронная техника. 1984. Сер. 6, вып. 2. С. 16–19.
7. Пилипенко В. А., Попов Ю. П. Использование фотонных технологических процессов при изготовлении интегральных микросхем / Электронная промышленность. 1988. Вып. 5. С. 3–9.
8. Пилипенко В. А., Рожков В. В., Горушко В. А. Модель взаимодействия кремния с алюминием при фотонной обработке / Электронная техника. 1990. Сер. 2, вып. 3. С. 24–28.

УДК 535.232.14; 548.4

Казючиц Н. М., Казючиц В. Н., Русецкий М. С., Королик О. В., Дубинина А. А.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА НРНТ АЛМАЗАХ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Распределение центров излучательной рекомбинации после отжига облученных высокоэнергетическими ионами алмазов формируется под действием двух процессов: (i) стимулированной ионным облучением ускоренной агрегации азота, (ii) релаксацией упругих напряжений при пластической деформации алмаза в течение отжига

Использование алмазов в качестве сцинтилляторов подразумевает возможность возбуждения излучающих центров ионизирующими частицами (электронами, ионами, гамма-квантами) и создания преимущественно таких центров в алмазе. «Строительным материалом» для большинства центров излучательной рекомбинации в алмазах являются собственные дефекты структуры и примесные атомы азота [1]. В качестве инструментов, формирующих доминирующие центры излучательной рекомбинации, обычно используют радиационное воздействие в сочетании с термообработкой. Синтетические алмазы с относительно небольшой долей агрегированного азота допускают больше возможных вариаций при создании доминирующих излучающих центров. Примесь азота в них находится в форме одиночных атомов замещения. Одиночные атомы азота не являются оптически активными. Но оптическую активность проявляют агрегированный азот в комплексе с вакансией углерода. Скорость агрегации азота возрастает в присутствии вакансий, созданных предварительным облучением алмазов быстрыми электронами [2]. Облучение алмазов ионами обычно не применялось для этих целей из-за приповерхностного воздействия.

Цель работы – создать центры излучательной рекомбинации в алмазе ионным облучением с энергией ионов около одного МэВ/нуклон. Ожидаемая глубина радиационного воздействия составляет в этом случае около 10 мкм.

В экспериментах использовали полированные пластины синтетического НРНТ алмаза Ib типа толщиной около 500 мкм с ориентацией поверхности (100), которые облучали ионами Хе с энергией 167 МэВ в диапазоне флюенсов от  $1.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $8.15 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Температура образцов при облучении не превышала 30 °С. Облученные пластины отжигали в диапазоне температур 250 – 1450 °С в смеси аргона и водорода в течение 30 минут при каждой температуре. Перед измерениями спектров ФЛ отожженные пластины очищали от графита в кипящем растворе дихромата калия в серной кислоте.

Измерения спектров ФЛ вдоль траектории ионов Хе были выполнены микрорамановским спектрометром Nanofinder HE (LOTIS TII Japan-Belarus) при сканировании сфокусированным возбуждающим излучением поперечного сечения облученной алмазной пластины [3]. Спектральное разрешение спектрометра составляло  $2.3 \text{ см}^{-1}$ . Шаг сканирования – около 1 мкм. Для возбуждения ФЛ использовали лазер с длиной волны 355 нм мощностью 4 мВт. Диаметр сфокусированного лазерного излучения составлял около 1 мкм.

Измерения были выполнены в трех областях пластины: в кубическом секторе роста в центре пластины – бесцветная область, в октаэдрическом секторе роста на периферии пластины – желтая область, в октаэдрическом секторе роста граничащим с кубическим сектором в центре пластины – люминесцирующая область. Структура спектров ФЛ после облучения ионами Хе приведена для этих областей пластины на рисунке 1 для комнатной температуры и для температуры жидкого азота. В бесцветной области пластины алмаза доминировали наведенные облучением центры ФЛ 389 нм, ND1, TR12, 3H, NV<sup>0</sup>, GR1 [1, 2, 4]. После охлаждения пластины до температуры жидкого азота в спектрах появилась линия при 454 нм. Атомная структура соответствующего центра пока не установлена. Но, так как центр 454 нм наблюдали только в облученном ионами слое, то его следует связать с радиационными по-



вреждениями. За ФЛ при 389 нм ответственны центры, содержащие междуузельный азот. Центр ND1 с бесфононной линией при 393 нм сформирован первичными радиационными дефектами – вакансиями в отрицательном зарядовом состоянии [4]. Центр TR12 с бесфононной линией при 470 нм приписывают радиационному дефекту с междуузельными атомами углерода. Линия ФЛ при 503.5 нм соответствует радиационному 3Н-центру, в состав которого также входят собственные междуузлия. Линия 575 нм – NV<sup>0</sup>-центр соответствует комплексу азот-вакансия в нейтральном зарядовом состоянии. GR1-центр с бесфононной линией при 741 нм образован вакансиями в нейтральном зарядовом состоянии.

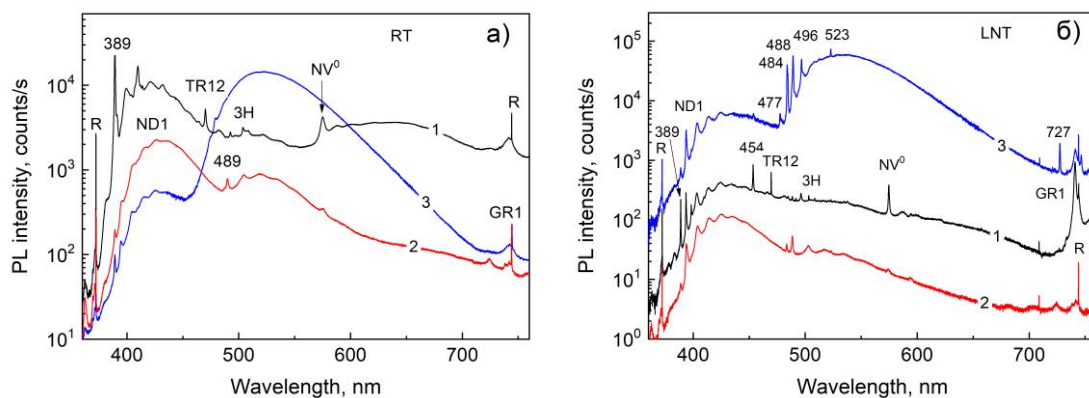


Рисунок 1 – Структура спектров ФЛ в алмазе, облученном ионами Хе флюенсом  $F = 6.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ : (а) – при комнатной температуре, (б) – при температуре жидкого азота; кривые 1, 2, 3 – бесцветная, желтая, люминесцирующая области кристалла, соответственно

В облученной желтой области пластины доминировали центры ФЛ при 393 нм (ND1-центр) и при 489 нм. При температуре жидкого азота в спектрах ФЛ появилась связанная с никелем линия при 484 нм. Центры 389 нм и NV<sup>0</sup> слабо выражены, а центры TR12, 3Н, и GR1 практически отсутствовали в спектрах ФЛ желтой области. Излучение центров ND1 и 489 нм наблюдали только в облученном ионами Хе слое. Увеличение интенсивности ФЛ центра 489 нм с содержанием азота и его формирование непосредственно при облучении позволили связать его с азотсодержащим первичным радиационным дефектом, возможно, отрицательно заряженным.

В люминесцирующей области пластины структура спектров образована доминирующим излучением ND1-центра, слабым излучением центра 389 нм и никелевого дуплета 417 нм и 418 нм, зеленым излучением никельсодержащих центров, образующих S2 и S3 серии линий при 477 нм, 484 нм, 488 нм, 496 нм, 523 нм, инфракрасным излучением никелевого центра с линией при 727 нм [1] и слабым излучением GR1-центра.

Преобразования спектров ФЛ с отжигом приведены на рисунке 2а для бесцветной области пластины. Связанные с собственными междуузельными дефектами центры при 503.5 нм (3Н) и при 470 нм (TR12) исчезли после отжига при температурах 750 °С и 950 °С, соответственно. Интенсивность междуузельного азотного центра при 389 нм существенно уменьшилась лишь после отжига при температуре 1450 °С. Центры ND1 и GR1, связанные с одиночными вакансиями, практически полностью отожглись при температуре 750 °С. Синхронно с отжигом вакансий увеличивалась интенсивность ФЛ центров NV<sup>0</sup> и NV<sup>-</sup>, содержащих один атом азота и одну вакансию. Зарождение НЗ центров при 503.2 нм, связанных с простейшими агрегатами азота и состоящих из вакансии и двух атомов азота в узлах, стало заметным начиная с температуры 950 °С. Дальнейшее повышение температуры отжига сопровождалось быстрым ростом интенсивности ФЛ всех азот-вакансионных центров.

Распределение интенсивности основных центров ФЛ с глубиной после отжига при температуре 1450 °С показаны на рисунке 2б. Видно, что эффективность образования всех центров ФЛ выше в облученном ионами слое алмаза, чем в необлученном. Из этого следует, что ионное облучение ускоряет (стимулирует) образование центров излучательной рекомбинации. Глубокие хвосты распределения интенсивности большинства центров ФЛ за проек-

тивным пробегом ионов Хе могут быть следствием диффузии созданных облучением вакансий/междоузлий углерода и/или пластической деформации алмаза в течение отжига. Принимая во внимание, что вакансии/междоузлия радиационной природы отождились при температуре 750 °С, деформационный механизм генерации вакансий/междоузлий представляется более вероятным. В самом деле, внедрение ионов Хе на значительную глубину вызвало неоднородное расширение кристаллической решетки в облученном слое [3], которое сдерживалось неповрежденной частью пластины. На границе между облученным и неповрежденным алмазом создавались напряжения. При температурах пластической деформации алмаза (более 1000 °С [5]) напряжения релаксировали с образованием дислокаций [6]. Образование дислокаций сопровождалось генерацией вакансий. Атомы азота захватывали подвижные вакансии и формировали азот-вакансионные комплексы.

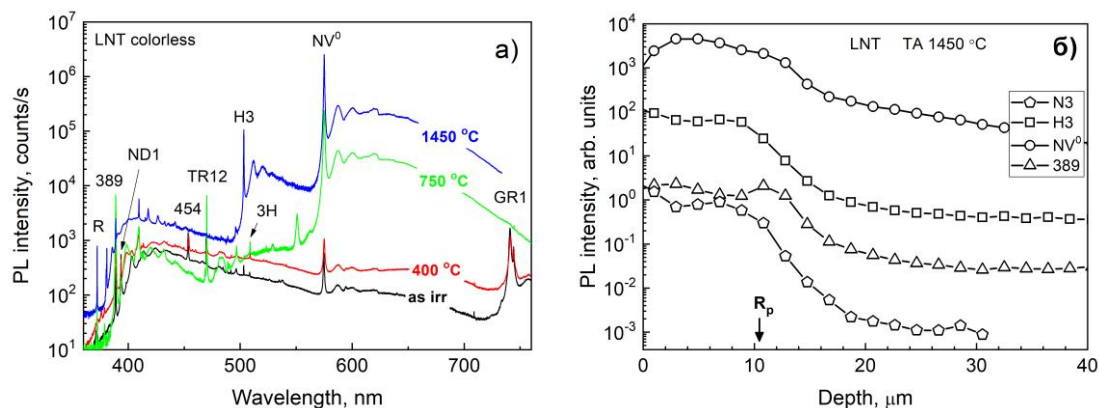


Рисунок 2 – Эволюция спектров ФЛ при отжиге облученных ионами Хе алмазов (а), распределение интенсивности центров ФЛ с глубиной после отжига при  $T = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б); флюенс  $F = 6.1 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-2}$

Еще одним процессом, сопровождающим отжиг облученных ионами алмазов, была диффузия атомов азота с образованием его агрегатов. Индикатором агрегации азота стало образование НЗ- и N3-дефектов, состоящих из двух и трех атома азота и вакансии, соответственно. Как видно из рисунка 2б, интенсивность соответствующих центров ФЛ в облученном ионами слое много больше, чем в необлученном. В отличие от необлученных, отжиг облученных ионами алмазов сопровождался пластической деформацией и генерацией большого количества вакансий/междоузлий. Известно, что созданные предварительным электронным облучением вакансии [2] в алмазах ускоряли агрегацию азота. По-видимому, созданные пластической деформацией вакансии/междоузлия также ускоряли агрегацию азота.

#### Список литературы

1. Optical properties of diamonds: a data handbook. A. M. Zaitsev // Springer – 2001. – 502p.
2. Collins A. T. Vacancy enhanced aggregation of nitrogen in diamond // Journal of Physics C: Solid State Physics. – 1980. – Vol. 13. – №. 14. – P. 2641.
3. Kazuchits N. M. Raman scattering in diamond irradiated with high-energy xenon ions / N. M. Kazuchits, O. V. Korolik, M. S. Rusetsky, V. N. Kazuchits, N. S. Kirilkin, V. A. Skuratov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2020. – Vol. 472. – P. 19–23.
4. Kazuchits N. M. Luminescence of negatively charged single vacancies in diamond: ND1 center / N. M. Kazuchits, V. N. Kazuchits, M. S. Rusetsky, A. V. Mazanik, V. A. Skuratov, K. S. Moe, A. M Zaitsev // Diamond and Related Materials. – 2022. – Vol. 121. – P. 108741.
5. Weidner D. J., Wang Y., Vaughan M. T. Strength of diamond // Science. – 1994. – Vol. 266. – №. 5184. – P. 419-422.
6. Brookes E. J. A study of plastic deformation profiles of impressions in diamond / E. J. Brookes, J. D. Comins, R. D. Daniel, R. M. Erasmus // Diamond and related Materials. – 2000. – Vol. 9. – №. 3-6. – P. 1115-1119.

УДК 537.311.3, 538.945, 537.9

Каланда Н. А.<sup>1</sup>, Ярмолич М. В.<sup>1</sup>, Петров А. В.<sup>1</sup>, Сонных А. Д.<sup>2</sup>, Голосов Д. А.<sup>3</sup>,  
Завадский С. М.<sup>3</sup>, Свито И. А.<sup>2</sup>

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИН ТРАНСПОРТНЫХ ТОКОВ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ  
 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01 Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12-\delta}$  В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР**

<sup>1</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

В работе приведены исследования по изучению влияния величин транспортных токов на электротранспортные характеристики двухфазных композитов  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  в низкотемпературной области. Установлено, что с увеличением времени отжига сверхпроводящие свойства композитов ухудшаются из-за изменений в кристаллической структуре и взаимодействия магнитных частиц с матрицей  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Обнаружено, что транспортный ток проявляет резистивное и сверхпроводящее поведение, но вблизи критических плотностей тока зависимость  $J=f(U)$  нелинейна, и скорость роста тока определяется временем синтеза композита.

Малые значения длины когерентности  $\xi \sim 10^{-7}$  м в  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  снижают предельное значение ширины потенциального барьера для куперовских пар, что делает даже незначительные примеси других фаз на межзеренных границах ведущими себя как слабые (джозефсоновские) контакты между сверхпроводящими зёрнами [1]. Особенно технологичными являются двухфазные композиты на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  с магнитными добавками, такими как  $Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$ . Широкие возможности экспериментального исследования протекания тока через слабые связи двухфазных композитов  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  делают их привлекательными для исследователей.

Двухфазные композиты на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  являются моделью сети слабых связей с заранее заданными параметрами. Изучение особенностей протекания сверхпроводящего тока по слабым связям, формируемым "искусственными" границами в этих композитах, предоставляет возможность в сравнении с "естественными" межкристаллитными границами установить их природу [2]. Сопоставление результатов исследований композитов с существующими теориями в литературе позволяет определить физические процессы, определяющие протекание тока через эти материалы, что является важной научной задачей. Таким образом, актуальность вызвана исследованием новых композитных материалов  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  в материаловедческом и прикладном плане, как материалов, обладающих ценными для практического применения свойствами.

Для синтеза соединений  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и  $Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  использовались оксиды  $Y_2O_3$ ,  $Vi_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CuO$  и карбонат  $BaCO_3$  марки "ОСЧ". Электротранспортные характеристики измеряли четырехзондовым методом

Известно, что из-за низкой кинетики химического взаимодействия между  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  и  $Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  появляется возможность изготовления композита  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta} + 0.01Vi_{0.2}Y_{2.8}Fe_5O_{12}$  по режиму быстрого спекания, который позволяет приготовить композиты с четкими границами между гранулами ингредиентов, что приводит к реализации в образце сети слабых связей с атомарно резкими границами. Критическая температура начала перехода в сверхпроводящее состояние исследуемых композитов  $T_c \sim 92,1$  К совпадает с  $T_c$  однофазной керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (рисунок 1). Установлено, что скорость деградации сверхпроводящих свойств композитов существенным образом зависит от продолжительности синтеза. С увеличением времени отжига при  $T=1260$  К от 10 минут (№1), 30 минут (№2) до 50 минут (№3) все образцы композитов демонстрируют металлический тип проводимости и значения

ширины перехода в сверхпроводящее состояние возрастают от  $\Delta T_1 = 3$  К до  $\Delta T_3 = 15$  К (рисунок 2).

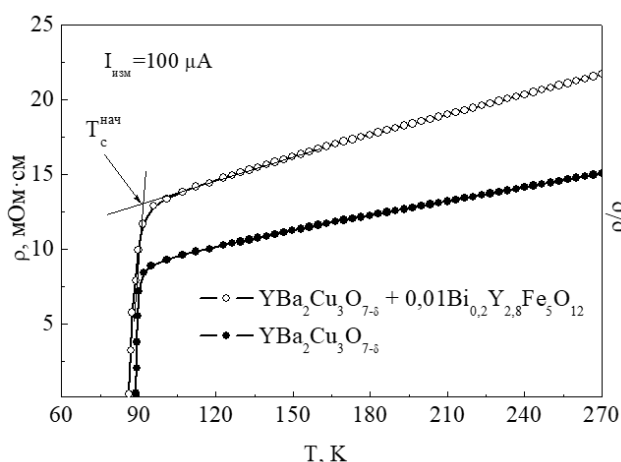


Рисунок 1 – Температурные зависимости удельного сопротивления композита  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и однофазной керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .

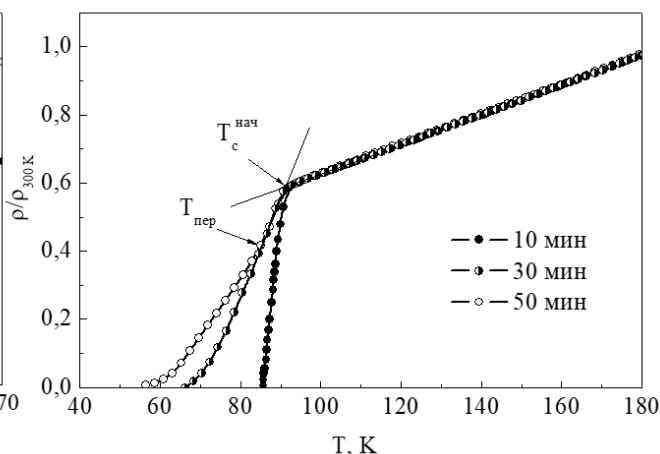


Рисунок 2 – Температурные зависимости нормализованного удельного сопротивления композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , отожженных в течение 10, 30, 50 мин.

Постоянное значение  $T_c = 92,1$  К и увеличение  $\Delta T$  с ростом  $t$  для всех образцов №1-3 связано с неизменностью сверхпроводящих характеристик зерен  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и уменьшением прозрачности магнитной прослойки фазы  $\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ . Это происходит из-за увеличения толщины слабой связи и снижения длины свободного пробега свободных носителей заряда в ней. Увеличение времени отжига до 50 минут способствует химическим процессам и увеличению фазовой неоднородности на межзеренных границах сверхпроводника. Также важную роль играют тепловые флуктуации из-за высокой анизотропии проводимости и малой длины когерентности, особенно при температурах близких к температуре перехода в сверхпроводящее состояние. Эти флуктуации разрушают фазовую когерентность между сверхпроводящими границами зерен купрата иттрия бария, вызывая проскальзывание фазы на  $2\pi$  и возникновение разности потенциалов на слабой связи.

Для изучения влияния слабых связей на электротранспортные характеристики композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  были исследованы их вольт-амперные характеристики (ВАХ) (рисунок 3). Сравнение ВАХ и политермических зависимостей электросопротивления  $\rho=f(T)$  композитов (рисунок 2) позволяет предположить, что транспортный ток в этих композитах протекает по сверхпроводящим каналам типа S-J-S, и с увеличением времени отжига до 50 минут межзеренные связи начинают оказывать более значительное влияние на уширение перехода в сверхпроводящее состояние. Данные ВАХ также показывают, что степень деградации сверхпроводящих свойств возрастает при увеличении времени отжига. Это, на наш взгляд, обусловлено малой прозрачностью межзеренных границ S-M-S, где S - сверхпроводящее зерно  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ , M – ферромагнетик, что приводит к уменьшению критических плотностей тока бездиссипативно проходимых по композиту, а также малой длиной свободного пробега свободных носителей заряда. Эти данные ВАХ указывают на увеличивающееся влияние слабых связей на электротранспортные характеристики композитов (рисунок 4).

Увеличение времени отжига приводит к снижению диссипативных токов через слабые связи и к существенному снижению критических плотностей тока  $J_c$  в системе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ . При плотностях тока выше  $28$  А/см<sup>2</sup> для образца №3 наблюдается появление тока и его увеличение до значения  $U=45$  мВ. При дальнейшем увеличении напряжения в интервале 45-135 мВ, рост тока происходит более быстро и почти линейно зависит от напряжения. Обнаружено, что изменение напряжения  $\Delta U$  быстро увеличивается с увеличением времени синтеза композита (рисунок 4).

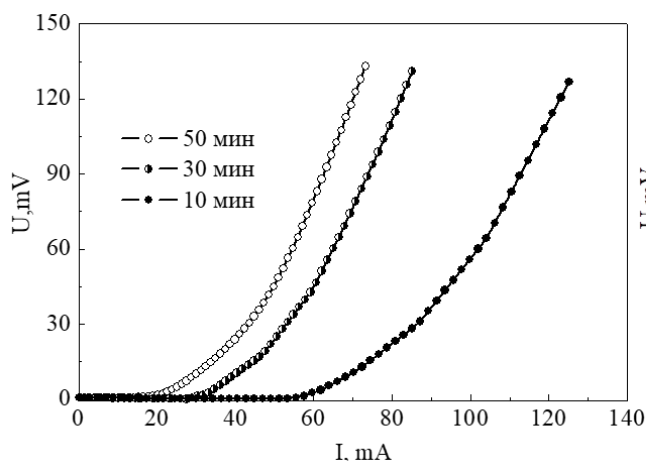


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , отожженных в течение 10, 30, 50 мин.

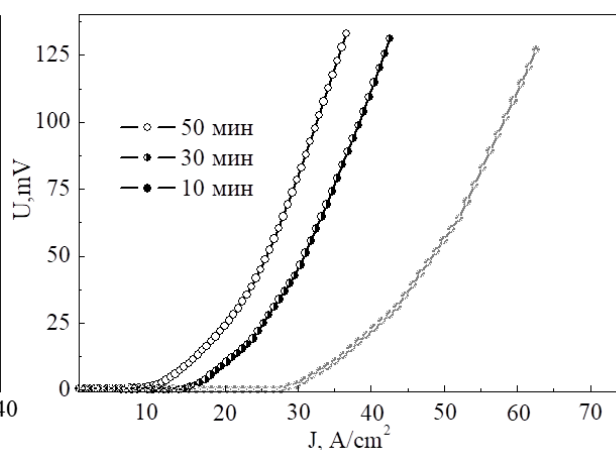


Рисунок 4 – Корреляционные зависимости между плотностью измерительного тока и напряженностью на потенциальных зондах композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , отожженных в течение 10, 30, 50 мин.

Из экспериментальных результатов следует, что в исследуемой системе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$  вольт-амперные характеристики имеют джозефсоновский вид [1]. При определенных плотностях тока, близких к критическим значениям, поведение зависимости тока от напряжения не является линейным и определяется временем синтеза. Это связано с тем, что купратные композиты представляют собой перколяционный кластер, состоящий из сверхпроводящей матрицы с включениями нормальной фазы, где течет и резистивный, и сверхпроводящий токи. При прохождении электрического тока через композиты на основе купратов происходит индукция электрического поля и движение вихрей, что может вызвать разрушение слабых связей. При превышении критических значений тока на слабых связях происходит распад матрицы на сверхпроводящие кластеры, что влияет на характер вольт-амперных характеристик из-за рассеяния энергии и неоднородного выделения джоулевого тепла.

Таким образом, исследования влияния транспортных токов на вольт-амперные характеристики двухфазных композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,01 \text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при низких температурах показали, что при совместном отжиге в течение 10 минут низкая кинетика химического взаимодействия между  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  и  $\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  позволяет получить композиты с  $T_c \sim 92,1 \text{ K}$  и атомарно резкими границами сети слабых связей. Однако, с увеличением времени отжига происходит существенное ухудшение сверхпроводящих свойств композитов из-за изменения кристаллической структуры и взаимодействия магнитных частиц со сверхпроводящей матрицей  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . В соответствии с данными вольт-амперных характеристик и политермическими зависимостями электросопротивления композитов, транспортный ток, протекающий по композиту, проявляет резистивное и сверхпроводящее поведение. Однако, вблизи критических плотностей тока зависимость  $J = f(U)$  нелинейна, и скорость роста транспортного тока определяется временем синтеза композита.

#### Список литературы

1. Chevriaux, D. Theory of a Josephson junction parallel array detector sensitive to very weak signals/ D. Cherviaux, R. Khomeriki, J. Leon // Physical Review B. – 2006. - Vol.73. – P.214516.
2. Sokhi, R. S. Investigation of films of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  using Rutherford backscattering spectrometry Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 1990. – Vol. 50. – P.140-144.

УДК 537.311.3, 538.945, 537.9

Каланда Н. А.<sup>1</sup>, Ярмолич М. В.<sup>1</sup>, Петров А. В.<sup>1</sup>, Сонных А. Д.<sup>2</sup>, Голосов Д. А.<sup>3</sup>,  
Завадский С. М.<sup>3</sup>, Семченко А. В.<sup>4</sup>

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ВЕЛИЧИН ТРАНСПОРТНЫХ ТОКОВ НА  
ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ  
YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + 0,07 Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> В ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА  
YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ**

<sup>1</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

<sup>4</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь

В работе приведены исследования по изучению влияния магнитного поля и величин транспортных токов на вольт-амперные характеристики двухфазных композитов YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + 0,07 Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> в температурной области перехода YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> в сверхпроводящее состояние. Установлено, что в этом интервале композиты проявляют слабую полупроводниковую проводимость и отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Показано, что изменяя величину транспортного тока, можно варьировать силу Джозефсоновской слабой связи, обусловленной диссипацией в межгранульной границе, и контролировать ширину перехода в сверхпроводящее состояние, а также при  $J > 1,2$  А/см<sup>2</sup> ликвидировать непрерывные сверхпроводящие токовые дорожки.

Научные исследования, связанные с эффектами диссипации в сверхпроводящих композитах с диэлектрической фазой, привлекают пристальное внимание ученых. Такие исследования позволяют оптимизировать композитные материалы для применения в электронике и энергетической промышленности. Использование слабосвязанных высокотемпературных сверхпроводников на основе контактов Джозефсона открывает новые возможности для создания и улучшения криоэлектронных устройств, таких как магнитометры, гальванометры, устройства спинтроники, микросхемы логики и памяти с высокой производительностью и др. [1].

Особый интерес исследователей привлекают композиты типа YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + ферромагнетик из-за их уникальных свойств, таких как немонотонная температурная зависимость критических плотностей тока вблизи температур перехода в сверхпроводящее состояние, гигантское магнитосопротивление, наличие π структур и электрических характеристик контактов в слабосвязанных высокотемпературных сверхпроводниках. Использование магнитных компонентов в таких композитах, приготовленных методом компактирования под высоким давлением, увеличивает чувствительность электротранспортных характеристик к влиянию внешних магнитных полей, особенно в области сверхпроводящего перехода. Наиболее информативные данные о влиянии условий синтеза на электротранспортные характеристики композита получаются из изучения температурных зависимостей электросопротивления в окрестности резистивного перехода при различных величинах внешнего магнитного поля. Поэтому в настоящей работе нами было исследовано влияние магнитного поля и величин транспортных токов на вольт-амперные характеристики (ВАХ) двухфазных композитов YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + 0,07Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> в температурной области перехода YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> в сверхпроводящее состояние при которых начинается срыв магнитных вихрей с центров пиннинга.

Для синтеза соединений YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> и Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> использовались оксиды Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO и карбонат BaCO<sub>3</sub> квалификации "ОСЧ". Электротранспортные характеристики измерялись четырехзондовым методом.

При рассмотрении политермических зависимостей удельного электросопротивления ( $\rho$ ), при различных значениях плотности измерительного тока, композита YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + 0,07 Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> обнаружено, что для всех значений J образцы обладают слабой полу-

проводниковой проводимостью в интервале температур  $300 - T_c^{\text{нач}}$  К, где  $T_c^{\text{нач}}$  - критическая температура начала перехода в сверхпроводящее состояние (рисунок 1).

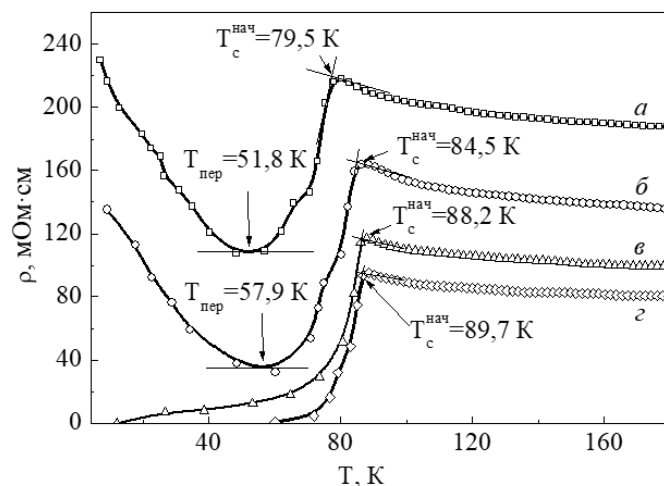


Рисунок 1 – Температурная зависимость удельного электросопротивления композита  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,07\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , измеренная при различных величинах измерительного тока: а)  $J = 0,03 \text{ A/cm}^2$ , б)  $J = 0,5 \text{ A/cm}^2$ , в)  $J = 1,2 \text{ A/cm}^2$ , г)  $J = 1,8 \text{ A/cm}^2$ .

При анализе температурной зависимости электросопротивления обнаружен отрицательный температурный коэффициент сопротивления ( $dp/dT$ ) в интервале температур  $300 - T_c^{\text{нач}}$  К. Это указывает на наличие непрерывной диэлектрической прослойки с невысокой высотой и шириной энергетического барьера, а также на туннелирование свободных носителей заряда между зернами  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . Наибольшее изменение удельного электросопротивления в интервале температур  $300 - T_c^{\text{нач}}$  К наблюдается при значениях транспортного тока от  $1,2 \text{ A/cm}^2$  до  $1,8 \text{ A/cm}^2$ . При этом, с увеличением измерительного тока, значение  $T_c^{\text{нач}}$  понижается от  $89,7 \text{ K}$  до  $79,5 \text{ K}$ , и точка перегиба смещается в сторону более низких температур ( $T_{\text{пер}} = 57,9 \text{ K}$  при  $J = 1,2 \text{ A/cm}^2$  и  $T_{\text{пер}} = 51,8 \text{ K}$  при  $J = 1,8 \text{ A/cm}^2$ ), при этом режим переноса заряда и ход зависимости температурного коэффициента сопротивления ( $dp/dT$ ) не меняются. Однако при этих значениях измерительного тока композит не переходит в сверхпроводящее состояние. Вероятно, такое поведение электросопротивления связано с увеличением электронного рассеяния на межзеренных границах  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  из-за присутствия на них магнитных включений  $\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$ , которые представляют собой энергетический барьер для движения свободного носителя заряда по композиту, а также обеднением кислородом приповерхностных областей зерен сверхпроводника, что уменьшает концентрацию куперовских пар в них и формирует композит с ослабленными сверхпроводящими берегами. Таким образом, изменяя величину транспортного тока, можно варьировать силу Джозефсоновской слабой связи, обусловленной диссипацией в межгранульной границе, и контролировать ширину перехода в сверхпроводящее состояние, а также при  $J > 1,2 \text{ A/cm}^2$  ликвидировать непрерывные сверхпроводящие токовые дорожки [1].

Для изучения влияния саморазогрева композита при измерении ВАХ проводили термостатирование в температурном интервале  $4,2-100 \text{ K}$  и в полях  $0-0,1 \text{ Тл}$  (рисунок 2). Установлена полностью воспроизводимость полученных результатов ВАХ при любой скорости нагрева и охлаждения ( $0,5-12 \text{ град/мин}$ ). Согласно данным ВАХ для композита  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,07\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$  величины токов, при которых  $E(J)=0$  с увеличением индукции внешнего магнитного поля уменьшаются и при  $B > 0,1 \text{ Тл}$  практически отсутствуют сверхпроводящие транспортные токи, что связано с проникновением магнитного поля в слабые связи. В этом случае при  $B > 0,1 \text{ Тл}$  происходит нарушение фазовой когерентности между высокотемпературными сверхпроводящими гранулами в композите, приводя к проскальзыванию фазы на  $2\pi$  с появлением разности потенциалов на слабой связи и наблюдается начало плавления

решетки абрикосовских вихрей, приводя их в движение без пиннингования в межкристаллитных связях.

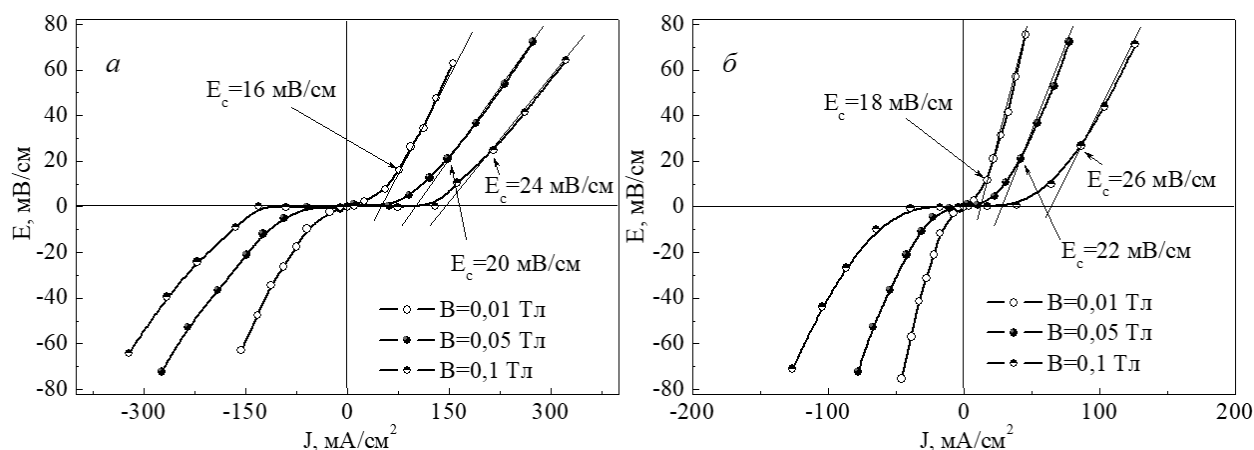


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики композита  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,07\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$ , измеренные при различных величинах внешнего магнитного поля при температурах 4,2 К (а) и 77 К (б).

Сравнивая ВАХ и политермические зависимости электросопротивления композитов, можно предположить, что композит  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,07 \text{ Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$ , полученный путем прессования механической смеси, проявляет сверхпроводящую и резистивную проводимость при транспортном токе. Внешнее магнитное поле вызывает появление слабого нелинейного роста напряженности электрического поля до некоторого значения  $E_c$ , после чего зависимость  $E=f(J)$  становится линейной при дальнейшем увеличении тока  $J$ . Это может указывать на то, что транспортный ток проходит как по сверхпроводящим гранулам, так и по магнетик. При дальнейшем увеличении магнитного поля наблюдается рост тока  $J$ , проходящего через слабые связи, и снижение сверхпроводящего тока. Если величина тока  $J$  становится больше  $J_c$ , то напряжение растет линейно, указывая на резистивный характер проводимости.

Таким образом, при исследовании влияния магнитного поля и токов на вольт-амперные характеристики композитов  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta} + 0,07\text{Bi}_{0,2}\text{Y}_{2,8}\text{Fe}_5\text{O}_{12-\delta}$  выявлено, что при всех значениях  $J$  образцы проявляют слабую полупроводниковую проводимость в интервале температур  $300 - T_c^{\text{нач}}$  К и отрицательный температурный коэффициент сопротивления. С увеличением измерительного тока наблюдается снижение значения  $T_c^{\text{нач}}$  от 89,7 К до 79,5 К, и точка перегиба смещается в сторону более низких температур ( $T_{\text{пер}} = 57,9 \text{ K}$  при  $J = 1,2 \text{ A/cm}^2$  и  $T_{\text{пер}} = 51,8 \text{ K}$  при  $J = 1,8 \text{ A/cm}^2$ ), при этом режим переноса заряда остается смешанным, и температурный коэффициент сопротивления не меняется. Изменение величины транспортного тока позволяет варьировать силу Джозефсоновской слабой связи, вызванной диссипацией в межгранульной границе, и контролировать ширину перехода в сверхпроводящее состояние, а также ликвидировать непрерывные сверхпроводящие токовые дорожки при  $J > 1,2 \text{ A/cm}^2$ . При  $B > 0,1 \text{ T}$  нарушается фазовая когерентность между сверхпроводящими гранулами в композите, ведущая к проскальзыванию фазы на  $2\pi$  и возникновению разности потенциалов на слабой связи. Транспортный ток в композите обладает сверхпроводящим и резистивным характером проводимости. При увеличении магнитного поля наблюдается рост диссипативно проходимых через слабые связи значений тока и существенное снижение сверхпроводящего тока.

#### Список литературы

1. Chevriaux, D. Theory of a Josephson junction parallel array detector sensitive to very weak signals/ D.Chevriaux, R.Khomeriki, J.Leon // Physical Review B. – 2006. - Vol.73. – P.214516.



## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Hf-Nb-Zr-Ti К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Исследовано влияние облучения ионами  $\text{He}^{2+}$  при различных температурах на структурно-фазовое состояние высокоэнтропийного сплава на основе системы HfNbZrTi. Сплав HfNbZrTi является неустойчивым к облучению ионами гелия с флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С, в результате чего наблюдается распад фаз.

Быстро растущий спрос на энергию и все больше внимания к экологическим проблемам создают импульс для быстрого роста интереса к ядерной энергии. В настоящее время около 430 коммерческих атомных энергетических реакторов в мире обеспечивают около 11% мировых поставок электроэнергии. Подавляющее большинство конструкционных материалов играют важную роль в реакторах деления. Для повышения безопасности и эффективности ядерных реакторов необходима разработка новых и перспективных ядерных конструкционных материалов с высокой устойчивостью к радиационному повреждению. Во многих случаях ключевая стратегия разработки материалов с высокой устойчивостью к радиационному повреждению основана на высокотемпературной фазовой стабильности, высокотемпературной прочности и стабильности размеров в условиях облучения, поскольку облучение может привести к увеличению плотности дефектов, что препятствует движению дислокаций и увеличивает напряжение течения. Конструкционные материалы для передовых ядерных систем должны выдерживать гораздо более высокие дозы нейтронов, более высокие температуры и чрезвычайно коррозионную среду, которые выходят за рамки характеристик материалов, используемых в современных ядерных системах [2]. В общем, обычные материалы для ядерных реакторов включают различные ферритные стали, аустенитные нержавеющие стали, сплавы циркония, керамика, композиты и т. д. У них может быть предел, чтобы выдержать высокую дозу облучения и суровые условия окружающей среды в будущей ядерной системе. Чтобы противостоять радиационным угрозам эксплуатации конструкционных материалов, используемых в ядерных системах, необходимо разработать новые конструкции, обладающие высокой радиационной стойкостью. В последнее время высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) или многоэлементные сплавы как новый тип сплавов становятся новым направлением исследований в сообществе металлических материалов. По сравнению с обычными сплавами с одним или двумя основными элементами, ВЭС обычно содержат 5-13 основных элементов с концентрацией каждого элемента от 5 до 35 ат.%. Последние исследования показывают, что некоторые ВЭА демонстрируют лучшую стойкость к облучению, чем традиционные сплавы, такие как повышенная стойкость к набуханию, уменьшенное развитие дислокаций, значительное снижение накопления повреждений и т. д. Тугоплавкие высокоэнтропийные сплавы (RHEA) стимулировали быстрорастущие исследования благодаря их исключительным высокотемпературным механическим свойствам и большому потенциалу применения в термически агрессивных средах (например, в аэрокосмической и энергетической промышленности). Однако ключевым узким местом, мешающим их реальному применению, является хрупкость и плохая пластичность при низких температурах. Недавно сообщалось, что РЭА HfNbTiZr может преодолеть это препятствие, демонстрируя сочетание высокой прочности и хорошей пластичности. Чтобы способствовать применению этого сплава при повышенных температурах, поддержание высокой фазовой стабильности в широком диапазоне температур в течение длительного срока службы имеет решающее значение для сохранения его стабильных структурных характеристик.[1]

В данной работе исследовался образец высокоэнтропийного сплава HfNbZrTi методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. Далее проводился отжиг на протяжении

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

24 ч и 72 ч при температуре 1150 °С с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Один из образцов облучался ионами  $\text{He}^{2+}$  с энергией 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре, другая часть облучалась ионами  $\text{He}^{2+}$  с энергией 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С.

Наблюдение морфологии поверхности (описать какая сторона, излом, до и после обработки и т. д.) исследуемых образцов осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа марки LEO 1455VP фирмы «Carl Zeiss». При этом регистрировался сигнал отраженных и вторичных электронов одновременно или поочередно.

Результаты ПЭМ облученного образца демонстрирует нам однородные фазы ОЦК, что доказывает то, что распад фаз напрямую связан с температурным воздействием. Также ТЕМ показал, что средние размеры пузырьков гелия составляют менее 3 нм и эти наноразмерные пузырьки гелия высокой плотности распределяются от поверхности образца до области пика. Данные SEM показали, что больший размер пузырьков имплантированного гелия и меньшая числовая плотность проявляются при более высокой температуре, что видно из рисунка 1.

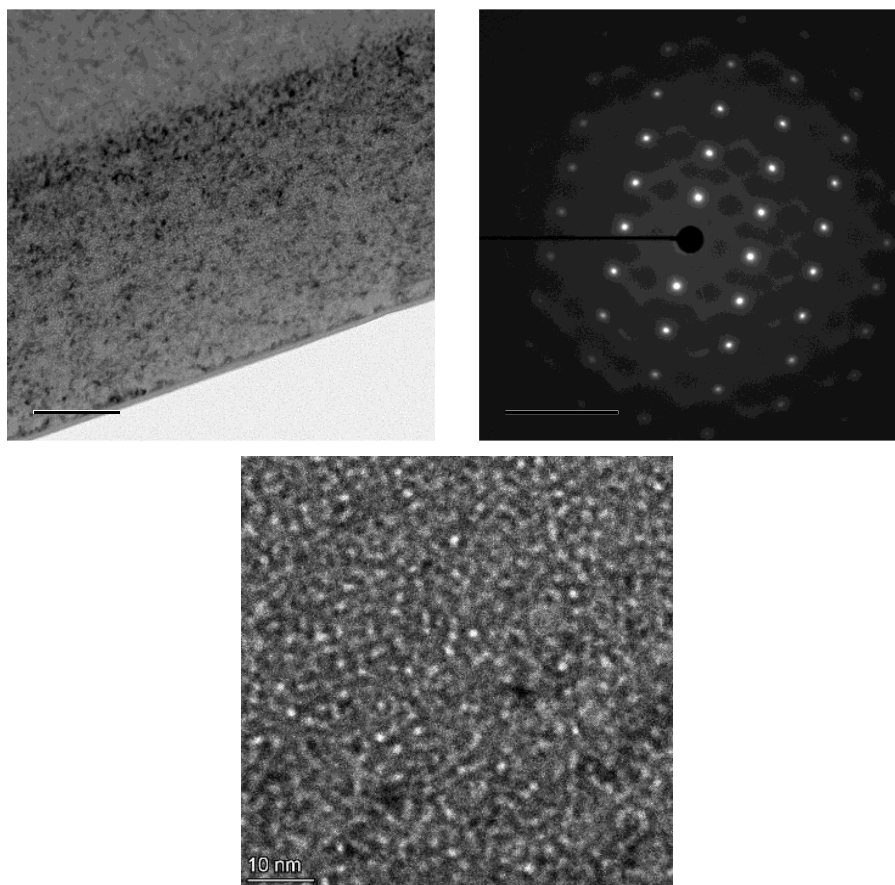


Рисунок 1 – Демонстрация ПЭМ и СЭМ снимков сплава HfNbZrTi при облучении ионами  $\text{He}^{2+}$

Результаты исследования фазового состава с помощью метода рентгеноструктурного анализа (РСА) продемонстрированы на Рисунке 2 и представляют собой дифрактограммы для необлученных образцов и образцов облученных ионами  $\text{He}^{2+}$  при комнатной температуре, и температуре равной 700 °С. Видно, что HfNbZrTi представляют собой однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой. Параметр решетки для исходного образца составил 0.687079 нм. Исходя из данных дифрактограммы, наблюдается распад фаз при 700 °С. Схожие явления распада демонстрируется и в образцах HfNbTaZrTi, при облучении его при высокой температуре[4]. Данный распад является результатом сегрегации, то есть явление, которое возникает в ходе высокотемпературного движения дефектов, которые захватывают близлежащие атомы решетки. Как результат, тяжёлые атомы Hf и Zr выделяются в отдельную ГПУ фазу, как видно на рисунке 2[3].

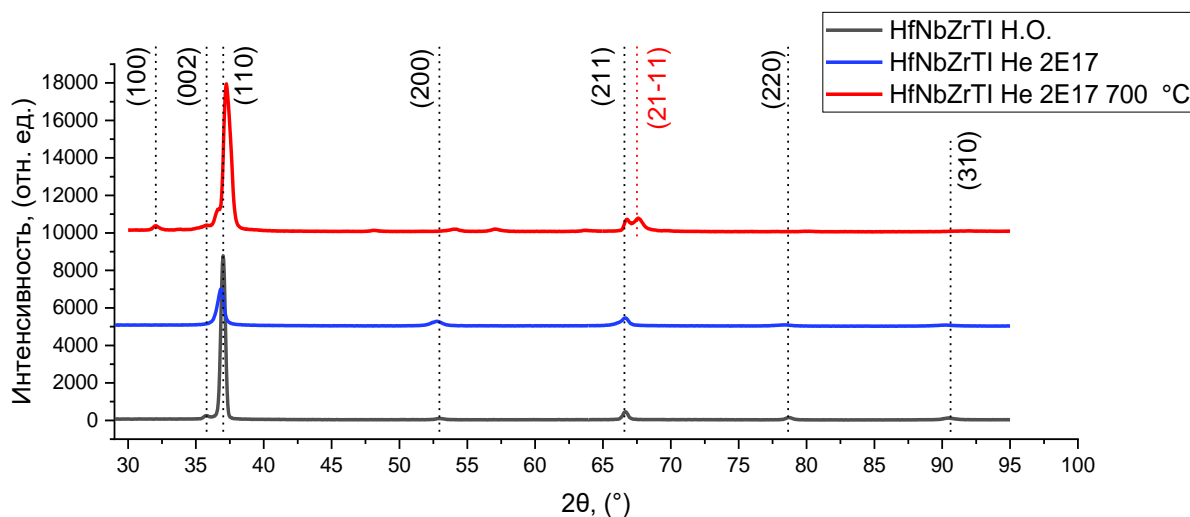


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы образцов HfNbZrTi: не облученного и облученных ионами He<sup>2+</sup> 40 кэВ с флюенсами  $2 \times 10^{17}$  при комнатной температуре и флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С

Таким образом, фазовый состав высокоэнтропийного сплава HfNbTiZr является устойчивым к облучению ионами He<sup>2+</sup> с энергий 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17}$  при комнатной температуре и нестабильным к облучению с флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при температуре 700 °С. В результате высокотемпературного облучения наблюдается распад однофазной ОЦК структуры, что вероятно связано с образованием метастабильной ГПУ-фазы. Анализ SEM и TEM изображений показал данные о сохранении единой ОЦК структуры при облучении гелием при комнатной температуре, что соответствует данным рентгеноструктурного анализа

#### Список литературы

1. Song-qin XIA , Zhen WANG , Teng-fei YANG , Yong ZHANG Irradiation Behavior in High Entropy Alloys, JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL. 2015, 22(10): 879-884
2. S. J. Zinkle, K. A. Terrani, L. L. Snead, Curr. Opin. Solid. St. Mater. 20 (2016) 401-410
3. H. Okamoto, Desk Handbook: Phase Diagrams for Binary Alloys, ASM International, Materials Park, OH, 2000
4. S. Y. Chen , Y. Tong , K.-K. Tseng , J.-W. Yeh b , J. D. Poplawsky , J. G. Wen , M. C. Gao , G. Kim , W. Chen , Y. Ren , R. Feng, W. D. Li, P. K. Liaw, Phase transformations of HfNbTaTiZr high-entropy alloy at intermediate temperatures, 2018

UDC 620.3

Komarov F. F.<sup>1</sup>, Vlasukova L. A.<sup>2</sup>, Milchanin O. V.<sup>1</sup>, Kuchinski P. V.<sup>1</sup>, Alzhanova A. E.<sup>3</sup>, Berencén Y.<sup>4</sup>, Wang T.<sup>2</sup>, Zhussupbekov K.<sup>5</sup>, Zhussupbekova A.<sup>5</sup>

## INFRARED INTERBAND ABSORPTION IN SILICON HYPERDOPED WITH SELENIUM BY ION IMPLANTATION WITH SUBSEQUENT PULSED LASER ANNEALING

<sup>1</sup>A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>L.N.Gumilev Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

<sup>4</sup>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institute of Ion Beam Physics and Materials Research, Dresden, Germany

<sup>5</sup>School of Physics and Centre for Research on Adaptive Nanostructures and Nanodevices (CRANN), Trinity College Dublin, Dublin, Ireland

Слои кремния, сверхпересыщенные селеном, были сформированы путем имплантации Se (140 кэВ,  $3.1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и  $6.1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) с последующим импульсным лазерным отжигом ( $\lambda = 694 \text{ нм}$ ,  $W = 2.0 \text{ Дж/см}^2$ ,  $\tau = 70 \text{ нс}$ ). Концентрацию атомов Se определяли с помощью резерфордского обратного рассеяния. Образование промежуточной зоны внутри запрещенной зоны Si было доказано с помощью сканирующей туннельной спектроскопии. Для оценки степени кристалличности слоя легированного кремния и определения доли атомов Se в узлах решетки Si использовались значения выхода обратного рассеяния  $\chi_{\text{Si}}$  и  $\chi_{\text{Se}}$ , полученные из спектров RBS в режиме каналирования. Сравниваются и обсуждаются характеристики экспериментально зарегистрированных и теоретически оцененных характеристик промежуточной зоны. Наблюдалось значительное увеличение поглощения света в широкой области спектра (0.2-23.0 мкм).

Silicon represents the fundamental material of microelectronics. However, it was used in optoelectronics much less frequently because it has a relatively large band gap (1.12 eV) and is not able to absorb electromagnetic radiation of wavelength longer than 1.1  $\mu\text{m}$ . As a result, silicon photodetectors are insensitive at three main fiber-optic communication wavelength bands: S (1460-1530 nm), C (1530-1565 nm) and L (1565-1625 nm) [1]. Extending the sensitivity of silicon-based and silicon technology-compatible photodetectors to the IR range is therefore an active area of research. Currently, it is established that single-crystal silicon oversaturated with chalcogen atoms (S, Se and Te) exhibits the highest absorption coefficient ( $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) of light in the IR spectral range at room temperature [2-4]. The present work is devoted to Se-hyperdoped silicon layers fabricated by ion implantation followed by pulsed laser annealing. Our investigation focuses on the effect of ion fluence on structural and optical properties of Se-supersaturated silicon layers as well as on the theoretical and experimental evaluation of intermediate band characteristics.

Silicon (111) p-type double side polished wafer was implanted with 140 keV  $\text{Se}^+$  ions to the fluence of  $3.1 \times 10^{15}$  (Se (0.75%)/Si) and  $6.1 \times 10^{15}$  (Se (1.5%)/Si) ions/cm<sup>2</sup>. Pulsed laser irradiation of the implanted samples was carried out under the experimental conditions, i.e., with optical and pyrometric diagnostics in situ of phase transformations initiated by a ruby laser pulse ( $\lambda = 694 \text{ nm}$ , FWHM = 70 ns) with a uniform pulse energy distribution along the area with a diameter of 4 mm. The energy density  $W$  in the laser pulse was set as  $2 \text{ J/cm}^2$ . Scanning tunnelling microscopy (STM) and spectroscopy (STS) measurements were conducted using a commercial low-temperature system from the Createc with a base pressure of  $3 \times 10^{-11} \text{ mbar}$  at liquid nitrogen temperature (77 K). The preparation chamber of the ultrahigh-vacuum system is fitted with a cooling/heating stage (LEED). STM data were obtained in constant current mode using the single-crystalline W (001) tip. The samples were sputtered by Ar ions at the energy of 750 eV under  $2 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  ambient for 10 min in the preparation chamber. To collect some statistics and check reliability the STM/STS measurements were carried out at 5 different places with different scan windows.

### Results and discussion

The RBS spectra in the random and channeling regimes were obtained for selenium – implanted and annealed samples. For the random measurement, the sample were titled by  $5^\circ$  and then

rotated. After implantation the amorphous layers are produced for both ion fluencies. For these ion fluencies, the random yields of Se in ion-implanted and laser-annealed samples are almost the same. This suggests that Se is almost not lost during the laser annealing. The corresponding measured concentration profiles and calculated by SIMNRA code[5], for the as-implanted and laser-treated samples are presented in Fig.1. The Si melt lifetime  $\tau_m$  and thickness  $d_m$  of melted layer formed by ruby laser pulse with the energy density  $W = 2J/cm^2$  amounts to  $0.27 \mu s$  and  $0.4 \mu m$ , respectively.

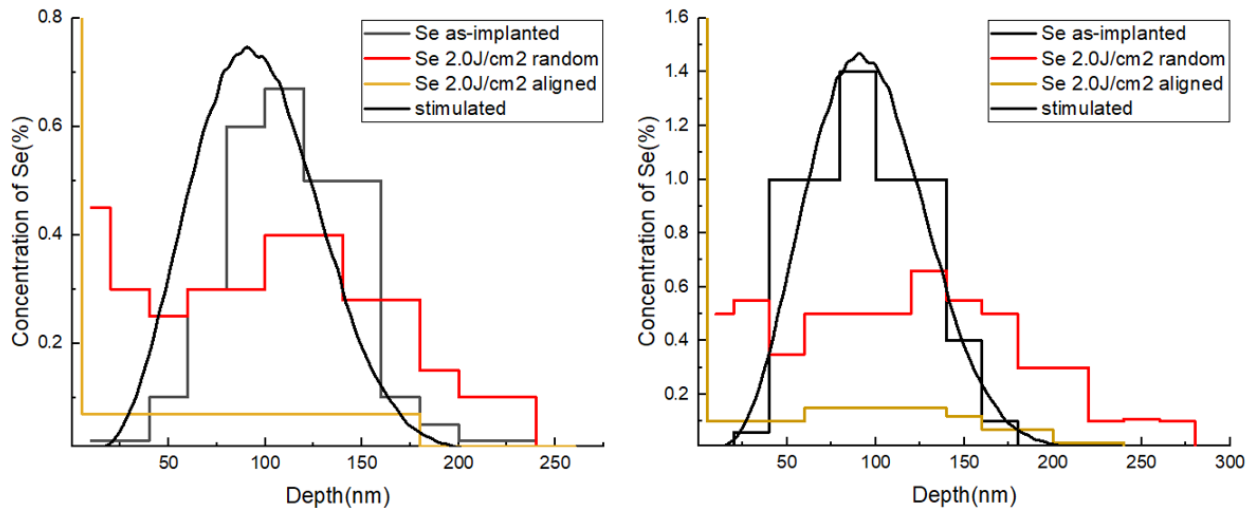


Figure 1 – Depth distribution of Se concentration measured in random and channeling regimes on the samples implanted with the fluence of  $3.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (a) and  $6.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (b).

Table 1 – The degree of crystallinity of silicon layer ( $f_{cr}$ ) and fraction of impurity at lattice sites after implantation of selenium ions and laser annealing  $W = 2 \text{ J/cm}^2$

Se ion fluence ( $\text{cm}^{-2}$ )	$f_{cr} = (1 - \chi^{Si}) / (1 - \chi^{min}), \%$	Se yield in random case ( $\text{Se/cm}^2$ )	Se yield in aligned case ( $\text{Se/cm}^2$ )	Se fraction in the lattice sites
$3.1 \cdot 10^{15}$	93.6	$3.05 \cdot 10^{15}$	$0.86 \cdot 10^{15}$	72.0%
$6.1 \cdot 10^{15}$	91.9	$5.46 \cdot 10^{15}$	$1.66 \cdot 10^{15}$	69.6%

STS data (not presented) show the visualization of band structure spatial fluctuations by the STS analysis and surface topography by the STM examination. The STS data reveal the sub-band states from 0.48 to 0.6 eV above the Fermi level. The average position for 5 pairs of measurements at different points (x,y) of the sample is 0.55 eV. The width of inter-band is varying from 0.15 eV to 0.3 eV. Roughly 1 % of spectra have the in gap-feature.

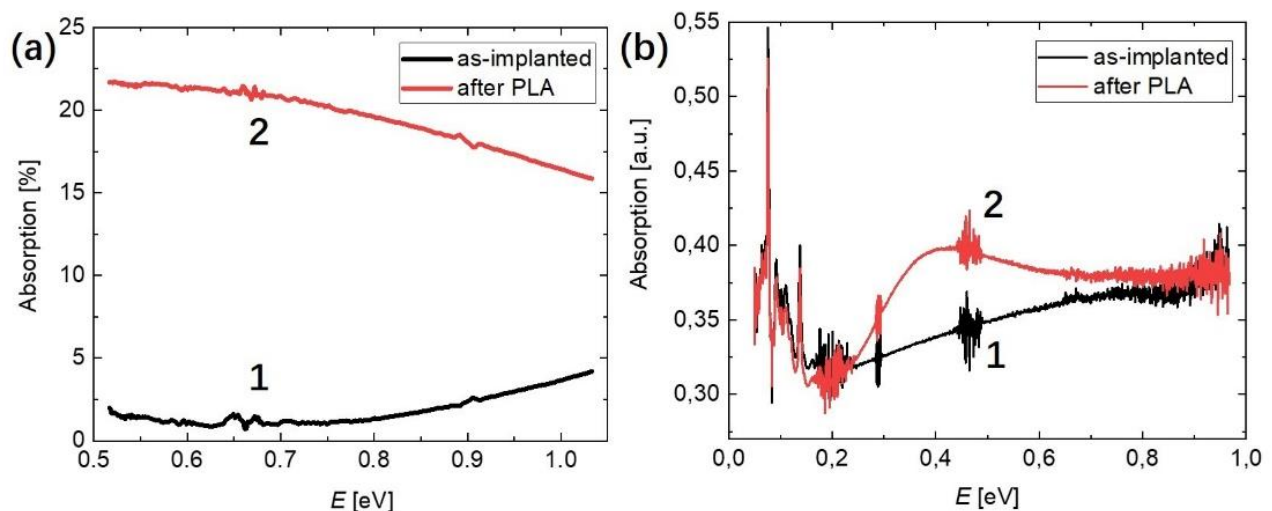


Figure 2 – Absorption spectra in NIR (a) and MIR (from FTIR spectra) (b) spectral ranges of the Se-implanted sample (Se (0.75%)/Si) before and after PLA

Figure 2 shows absorption spectra in NIR and MIR spectral ranges. The presented data (Figure 2b) for MIR also show increase of absorption after PLA. Moreover, there is observed the absorption band with maximum at 0.4 eV and with FWHM of 0.25 eV.

#### Conclusion

The energy density of  $W = 2 \text{ J/cm}^2$  is optimal from the point of view of structural perfection (>91%) of silicon and maximum concentration of Se at lattice sites (>69%) of silicon. The STS data reveal the sub-band states from 0.48 to 0.6 eV above the Fermi level inside the Si band gap. The measured characteristics of the intermediate band are in a reasonable agreement with the theoretical data of Ref[6]. The formation of intermediate sub-band inside Si band gap by hyperdoping with selenium and subsequent pulsed laser annealing lead to an increase in the intensity of the absorption spectrum by about 17 times in NIR range.

#### Reference

1. J. E. Carey, C. H. Crouch, M. Shen, E. Mazur, Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes. // Optics letters. – 2005. – V. 30(14). – P. 1773-1775.
2. I. Umez, J. M. Warrender, S. Charnvanichborikarn, A. Kohno, J. S. Williams, M. Tabbal, D. G. Papazoglou, X.-C. Zhang, M. J. Aziz, Emergence of very broad infrared absorption band by hyperdoping of silicon with chalcogens. // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113(21). –P. 213501(7pp.).
3. F. F. Komarov, N.S. Nechaev, G.D. Ivlev, L.A. Vlasukova, I.N. Parkhomenko, E. Wendler, I.A. Romanov, Y. Berencén, V.V. Pilko, D.V. Zhigulin, A.F. Komarov, Structural and optical properties of Si hyperdoped with Te by ion implantation and pulsed laser annealing. // Vacuum. – 2020. – V. 178. – P. 109434(6pp.).
4. F. F. Komarov, S.B. Lastovsky, I.A. Romanov, I.N. Parkhomenko, L.A. Vlasukova, G. Ivlev, Y. Berencén, A.A. Tsivako, N.S. Koval'chuk, E. Wendler, Te-hyperdoped silicon layers for visible-to-infrared photodiodes. // Technical Physics. – 2022. – V. 67(15). – P. 2448-2458.
5. M. Mayer, SIMNRA user's guide. — M.: Max-Planck-Institut für Physik, 1997. — 67 p.
6. K. Sánchez, I. Aguilera, P. Palacios, P. Wahnón, Formation of a reliable intermediate band in Si heavily coimplanted with chalcogens (S, Se, Te) and group III elements (B, Al). // Physical Review B. – 2010. –V. 82(16). – P. 213501(7pp).

УДК 539.2:669

Комаров Ф. Ф.<sup>1</sup>, Мильчанин О. В.<sup>1</sup>, Моховиков М. А.<sup>1</sup>, Власукова Л. А.<sup>2</sup>,  
Пархоменко И. Н.<sup>2</sup>, Wendler E.<sup>3</sup>

## ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ In И As

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Institut für Festkörperphysik, Friedrich-Schiller-Universität, Jena, Germany

Кремний, легированный атомами индия и мышьяка, является новым и перспективным материалом для создания солнечных элементов в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, а также для изготовления дискретных чувствительных инфракрасных фотодиодов. Слои кремния, легированного ионами индия и мышьяка, были изготовлены путем ионной имплантации с последующим импульсным лазерным отжигом (694 нм, 70 нс или 0,4 мс). Плотность лазерной энергии устанавливалась равной 1,6; 2,0; 2,5 и 40 Дж/см<sup>2</sup>. С использованием метода Резерфордского обратного рассеяния в сочетании с каналированием показано, что доля встраиваемых атомов In и As в решетке кремния после импульсной лазерной обработки составляет порядка 31-35 %. По спектрам поглощения света установлено, что степень поглощения в отожженных структурах, в сравнении с исходным кремнием, увеличивается более чем на несколько порядков величины в инфракрасной области спектра (эффективность поглощения составляет 50-55 %). В спектрах фотолюминесценции образцов обнаружена широкая полоса в спектральной области 1,1 – 1,6 мкм. Данный результат обсуждается в сравнении с ранее полученными данными по быстрому термическому отжигу аналогичных структур.

**Введение.** В последние годы большое внимание уделяется созданию композитных систем наноэлектроники и фотоники на основе кремниевой технологии с заменой электронной связи на оптическую. Кремний как материал солнечных элементов пропускает инфракрасную (ИК) часть солнечного спектра в диапазоне ~ 1,1 – 3 мкм, что составляет около 30 % всего потока солнечной энергии [1], в то время как кремниевые фотоприемники малочувствительны в области основных трех диапазонов волн: S (1460 – 1530 нм), C (1530 – 1565 нм) и L (1565 – 1625 нм) [2]. В последнее время ряд работ, опубликованных авторами настоящего исследования [3-4], были посвящены созданию светоизлучающих структур на основе нанокристаллов прямозонных полупроводников A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> в матрице Si и A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> в структурах SiO<sub>2</sub>/Si, в том числе узкозонных полупроводников InAs, InSb, GaSb и с большой шириной запрещенной зоны ZnSe, ZnO путем пересыщения кремния примесями III-V и II-VI групп периодической системы и последующего термического отжига. Однако оптические исследования, такие как видимое и ИК-поглощение этих структур, еще не проводились. В настоящей работе исследованы структурные и оптические свойства кремния, имплантированного ионами мышьяка и индия с последующим импульсным лазерным отжигом (ИЛО). Оптимизация режимов ИЛО может обеспечить высокий коэффициент поглощения света в ИК-диапазоне спектра. Настоящая работа направлена на поиск таких оптимальных условий лазерного отжига.

**Эксперимент.** В качестве исходных подложек выбирали окисленные (40 нм) пластины монокристаллического n- и p-типа легирования с ориентацией поверхности (100). Имплантация ионами As<sup>+</sup> (170 кэВ, 3,2×10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>) и In<sup>+</sup> (240 кэВ, 2,8×10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>) проводилась при 550 °С. ИЛО исследуемых образцов SiO<sub>2</sub>/Si:(As<sup>+</sup> + In<sup>+</sup>) проводили при плотностях энергии наносекундных (70 нс) или микросекундных (0,4 мкс) импульсов излучения рубинового лазера (λ = 694 нм), равных Вт = 1,6; 2,0; 2,5 Дж/см<sup>2</sup> и 40,0 Дж/см<sup>2</sup>, соответственно (таблица 1). Режим микросекундного облучения по сравнению с наносекундным позволяет проводить отжиг без образования фазы плавления.

Анализ глубинного распределения примесных атомов, доли атомов примеси в узлах решетки кремния и степени кристалличности имплантированных слоев проводился на основе данных, полученных из спектров Резерфордского обратного рассеяния (РОР). Спектры снимались на ускорительном комплексе AN-2500 в режимах каналирования (РОР/К) и без

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

него с использованием ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1,5 МэВ и углом регистрации  $170^\circ$ . Спектры пропускания и отражения образцов получали на спектрометре Lambda 1050 WB для спектрального диапазона 0,75 – 2,4 мкм и на спектрометре Spectrum 3 Optica для спектрального диапазона 2,5 – 24 мкм. Оптическое поглощение ( $A$ ) в исследованных слоях кремния рассчитывали по спектрам пропускания ( $T$ ) и отражения ( $R$ ), полученным в диапазоне от 0,8 до 2,5 мкм, по выражению:  $A = 100\% - R - T$ . Спектры фотолюминесценции (ФЛ) были получены при низкой температуре (4,2 К) с помощью Nd-лазера (532 нм) и охлаждаемого InGaAs-детектора.

Таблица 1

Время жизни расплава кремния  $\tau_m(W)$  и длительность лазерного импульса ( $t$ ), формируемого рубиновым лазером с плотностью энергии  $W$

Плотность энергии, $W$ (Дж/см <sup>2</sup> )	1,6	2,0	2,5	40,0
$t$	70 нс			0,4 мкс
$\tau_m$ (нс)	420	400	280	без плавления

**Результаты и обсуждение.** Информация о кристалличности кремниевой матрицы и скорости внедрения атомов In и As в кремниевую матрицу получена путем сравнения канализованного и случайного спектров POP. Минимальные значения выхода  $\chi^{\text{Si}}$  и  $\chi^{\text{In+As}}$  (определенные по сигналам от Si и (In + As) имплантированного слоя соответственно) использовались для оценки степени кристалличности имплантированного слоя Si и доли замещающих атомов In и As. В первом приближении долю  $f$  примесных атомов в позициях замещения рассчитывали по формуле [7]:  $f = (1 - \chi^{\text{In+As}})/(1 - \chi^{\text{Si}})$ . Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Степень кристалличности  $\chi^{\text{Si}}$  слоя кремния и  $f$  – доля примесных атомов в позиции замещения после ИЛО в различных режимах

Параметр	Образцы			
	$W = 1,6$ Дж/см <sup>2</sup>	$W = 2,0$ Дж/см <sup>2</sup>	$W = 2,5$ Дж/см <sup>2</sup>	$W = 40,0$ Дж/см <sup>2</sup>
$\chi^{\text{Si}}$ , %	62	53	56	75
$f$ , %	33	35	31	19

Значения  $\chi^{\text{Si}}$  составляют 53–62 % для имплантированных образцов после ИЛО при  $W = 1,6$ – $2,5$  Дж/см<sup>2</sup>. Для образца после ИЛО при  $W = 40$  Дж/см<sup>2</sup> величина  $\chi^{\text{Si}}$  значительно выше (75 %). Видно, что  $\chi^{\text{Si}}$  уменьшается с увеличением плотности энергии (от  $W = 1,6$  до  $2,5$  Дж/см<sup>2</sup>) в лазерном импульсе. Доля примеси в узлах кремниевой решетки превышает 30 % после ИЛО с плавлением образцов.

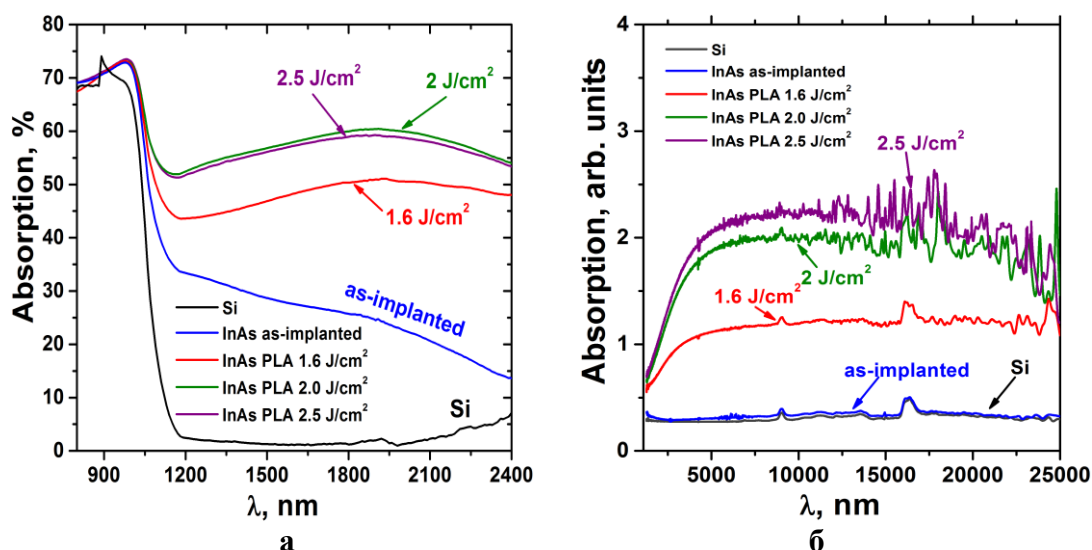


Рисунок 1 – Спектры поглощения в ближнем ИК-диапазоне (а) и в среднем ИК-диапазоне (б) после имплантации и облучения ИЛО при различных плотностях энергии в импульсе  $W = 1,6; 2,0$  и  $2,5$  Дж/см<sup>2</sup>



Анализ спектров поглощения имплантированных слоев, облученных лазерными импульсами с плотностью энергии в диапазоне от 1,6 до 2,5 Дж/см<sup>2</sup>, показал, что наибольший коэффициент поглощения в ближнем ИК диапазоне спектра (рисунок 1а) обнаружен при плотностях энергии 2,0 и 2,5 Дж/см<sup>2</sup>. Имплантация ионов In и As приводит к увеличению поглощения в ближнем ИК-диапазоне спектра от 1 – 2 % до 15 – 40 %. А после ИЛО значение поглощения образцов составляет порядка 50-55 %. Для оценки поглощения в среднем и дальнем инфракрасном спектральном диапазоне спектры были преобразованы в единицы поглощения по следующей формуле:  $A = 2 - \log(T)$  (рисунок 1б). В этом случае ИЛО приводит к увеличению поглощения в ~ 3,5 – 6 раз по сравнению с исходно имплантированными образцами. Наиболее эффективным режимом ИЛО для всего спектрального диапазона является 2 – 2,5 Дж/см<sup>2</sup>.

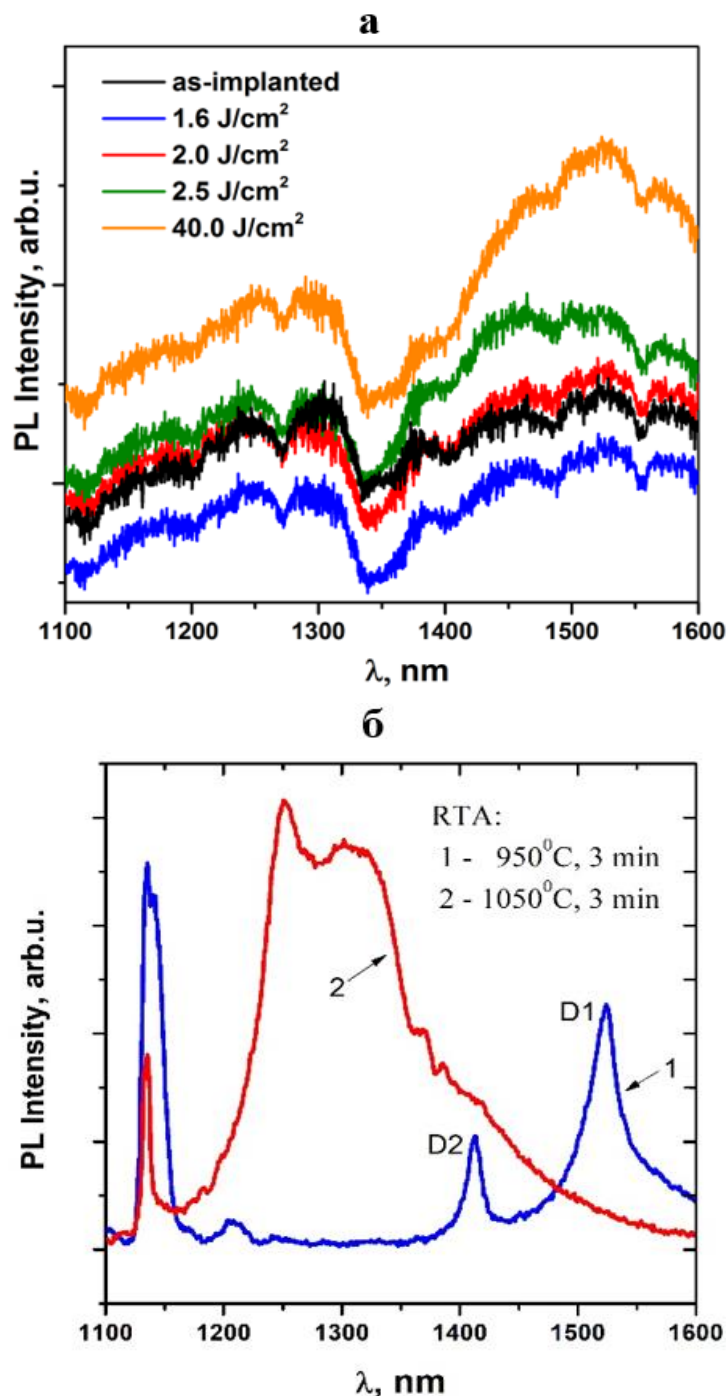


Рисунок 2 – Спектры ФЛ образцов Si, имплантированных (As+In) при 500°C, с последующим отжигом в различных режимах: а) ИЛО с плотностями энергии в импульсе  $W = 1,6; 2,0; 2,5$  и  $40,0$  Дж/см<sup>2</sup>, б) БТО – 950°C и 1050°C 3 минуты [4]

Спектр ФЛ (рисунок 2а) от имплантированного образца можно условно разделить на два диапазона. Первая область состоит из трех полос при 1180, 1250 и 1300 нм в диапазоне от 1100 до 1300 нм. Вторая область имеет четыре полосы при 1390, 1460, 1520 и 1580 нм. Лазерное облучение с плотностью энергии  $W = 1,6 \text{ Дж/см}^2$  уменьшает интенсивности всех полос. Увеличение плотности энергии до  $2,0 \text{ Дж/см}^2$  приводит к перестройке интенсивности спектра ФЛ. В спектре образца, облученного импульсом с энергией  $2,5 \text{ Дж/см}^2$ , наблюдается увеличение интенсивности ФЛ (вторая полоса) на 5–10%. В случае ИЛО при  $W = 40,0 \text{ Дж/см}^2$  интенсивность ФЛ возрастает на 7–10% по сравнению с облученным образцом при  $W = 2,5 \text{ Дж/см}^2$ , а максимум спектров ФЛ смещается в длинноволновую область (от 1460 до 1526 нм). Широкая полоса, появившаяся при 1520 нм, совпадает с линией дислокационной люминесценции D1 [5]. Полосы, возникающие при 1180 нм (X-линия) и 1250 нм (W-линия), обычно связаны с междоузельными или вакансионными кластерами в кремнии [5]. На рисунке 2б для сравнения представлены спектры ФЛ от образцов, полученных в нашей предыдущей работе [4] в похожих условиях, но с использованием быстрого термического отжига. В данном случае широкая полоса в области 1300 нм (кривая 2) связывалась с наличием большого количества нанокластеров InAs, а при меньшей температуре отжига проявлялись две полосы, связанные с дислокационной люминесценцией. Следует отметить, что значительная часть примеси встраивается в узлы решетки кремния, что обеспечивает высокий уровень поглощения в ИК-диапазоне спектра.

#### Список литературы

1. A. Luque, A. Marti, and C. Stanley, "Understanding intermediate-band solar cells," *Nat. Photon*, vol. 6, pp. 146–152, March 2012.
2. J. E. Carey, C. H. Crouch, M. Shen, and E. Mazur, "Visible and near-infrared responsivity of femtosecond-laser microstructured silicon photodiodes," *Opt. Letters*, vol. 30, pp. 1773–1775, February 2005.
3. F. Komarov, L. Vlasukova, W. Wesch, A. Kamarou, O. Milchanin, S. Grechnyi, A. Mudryi, and A. Ivaniukovich, "Formation of InAs nanocrystals in Si by high-fluence ion implantation," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 266, pp. 3557–3564, August 2008.
4. F. Komarov, L. Vlasukova, O. Milchanin, W. Wesch, E. Wendler, J. Zuk, and I. Parkhomenko, "Ion-beam synthesis and characterization of narrow-gap A3B5 nanocrystals in Si: Effect of implantation and annealing regimes," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 178, pp. 1169–1177, November 2013.
5. V. D. Tkachev, C. Schrödel and A. V. Mudryi, "Annealing of lattice damage in ion implanted silicon," *Rad. Effects*, vol.49, pp.133-136, 1980.

УДК 538.911, 539.25

Комаров Ф. Ф.<sup>1</sup>, Власукова Л. А.<sup>2</sup>, Мильчанин О. В.<sup>1</sup>, Пархоменко И. Н.<sup>2</sup>,  
Романов И. А.<sup>2</sup>, Мудрый А. В.<sup>3</sup>, Wendler E.<sup>4</sup>, Żuk J.<sup>5</sup>

## ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Friedrich- Schiller- University, Jena, Germany

<sup>5</sup>Maria Curie- Sklodowska University, Lublin, Poland

В работе рассмотрены результаты исследований по созданию светоизлучающих и фотоприемных приборов УФ-, видимого- и ближнего ИК- диапазонов на кремнии и по кремниевой технологии

Кремний является основным полупроводниковым материалом, используемым для производства интегральных микросхем, и занимает доминирующее положение на рынке с долей около 90%. Кремниевые чипы с ультравысоким уровнем интеграции образуют основу современной микроэлектроники и обеспечивают экспоненциальный рост производительности вычислительной техники. В настоящий момент вклад межсоединений в общее время задержки на логических элементах сопоставим или даже превышает время переключения транзисторов. Наиболее многообещающим решением проблемы увеличения быстродействия будущих интегральных схем является оптическая передача данных внутри Si кристалла. Оптические межсоединения обеспечивают скорость передачи данных ~ 30 - 60 Гбит/с, предел медной технологии оценивается в 20 Гбит/с. Фундаментальной проблемой, однако, является то, что кремний – непрямозонный полупроводник и, вследствие этого, имеет низкую квантовую эффективность межзонной излучательной рекомбинации. В последние годы специалисты в области микро- и оптоэлектроники усиленно работают над разработкой высокоэффективных излучателей в ближней-, средней-ИК и видимой области, волноводов, модуляторов и приемников излучения на кремнии, создание которых позволило бы объединить электронные и оптические приборы в единой интегральной схеме.

Для создания светоизлучающей структуры на основе кремния в ИК области, а именно в области так называемых окон прозрачности стандартного оптического волокна (1,3 мкм и 1,5 мкм), разрабатывается несколько подходов, в рамках которых исследуются люминесценция кремния, легированного ионами редких земель, дислокационная люминесценция, люминесценция на иных дефектах структуры Si, а также краевая люминесценция монокристаллического сильнолегированного кремния. Другой интересный подход, разработанный нами и рядом других лабораторий мира, к решению проблемы создания источника ИК излучения, основан на создании нанокристаллов прямозонных, узкозонных полупроводников  $A^3B^5$  (InAs, InSb, GaSb) в матрице кремния [1-3]. В этом случае спектральным положением длины волны излучения и интенсивностью свечения можно управлять путем изменения размеров и плотности распределения нанокристаллов. Эффективным способом создания массивов квантовых точек узкозонных полупроводников  $A^3B^5$  в матрице кристаллического кремния является метод ионной имплантации с последующим отжигом. Данный метод полностью совместим с промышленной технологией микроэлектроники.

Основой для создания люминесцентных соединений УФ и видимого диапазона выступают различные вещества, однако наиболее перспективными являются структуры  $A^2B^6$ . Большинство полупроводников  $A^2B^6$  являются прямозонными, что усиливает их люминесцентные свойства и расширяет область применения. Сочетание высокой вероятности излучательных переходов в диапазоне длин волн от 320 до 830 нм и высокой подвижности носителей заряда позволяет использовать прямозонные полупроводники  $A^2B^6$  (в том числе напри-

мер, ZnO, ZnSe, ZnS) [4-6] для получения источников и приемников излучения в видимом и УФ диапазоне, для создания светодиодов на квантовых точках, солнечных элементов, а также для изготовления элементов различных оптических приборов и устройств, применяемых в биологии, военной сфере и медицине.

Особого внимания заслуживают уже созданные нами структуры типа Zn-ядро/ZnO-оболочка в SiO<sub>2</sub>, которые представляют интерес из-за гетеропереходов на границе раздела Zn/ZnO [4]. Наноструктуры Zn/ZnO демонстрируют явное снижение поверхностного плазмонного резонанса цинка и значительное увеличение видимой фотолюминесценции от ZnO оболочки. Такая особенность наноструктур типа Zn-ядро/ZnO-оболочка повышает их квантовую эффективность по сравнению с ZnO нанокластерами или тонкими пленками этого соединения, и делает их перспективными для создания синих и белых светодиодов, для применения в дисплеях на квантовых точках (QLED), для создания флуоресцентных меток и ряда других оптоэлектронных применений.

Для синтеза наноструктур на основе соединений A<sup>2</sup>B<sup>6</sup> используем ионную имплантацию с последующими термообработками. Преимуществом этого метода является полная совместимость с современной кремниевой технологией. Метод ионной имплантации обеспечивает точную дозировку вводимой примеси, высокую чистоту и пространственную локальность.

Реализация оптоэлектронной пары (излучатель – приемник) требует также создания эффективного широкополосного кремниевого фотоприемника. В интегрированных приборах кремниевой фотоники детекторы должны обладать способностью регистрировать фотоны с энергией меньше, чем ширина запрещенной зоны (E<sub>g</sub>) Si (1,12 эВ или с длиной волны более, чем 1,1 мкм), которые могут эффективно распространяться с минимумом потерь внутри оптоволоконна или иных волноводных сред. Кремниевые фотодетекторы нечувствительны к трем основным полосам оптоволоконных телекоммуникационных систем: S (1460 - 1530) нм, C (1530 - 1565) нм и L (1565 - 1625) нм. Для решения данных проблем ведется активный поиск недорогих и эффективных ИК-фотодетекторов, совместимых с кремниевой КМОП-технологией.

Нами [7,8] и в ряде ведущих лабораторий мира микро- и оптоэлектронного профиля проводится разработка и исследование фотоприемников на принципах создания примесных подзон в запрещенной зоне Si путем введения примесей, создающих глубокие уровни (рисунок 1). Как показано, такие фотоприемники ближнего и среднего ИК-диапазонов способны эффективно работать при комнатных температурах.

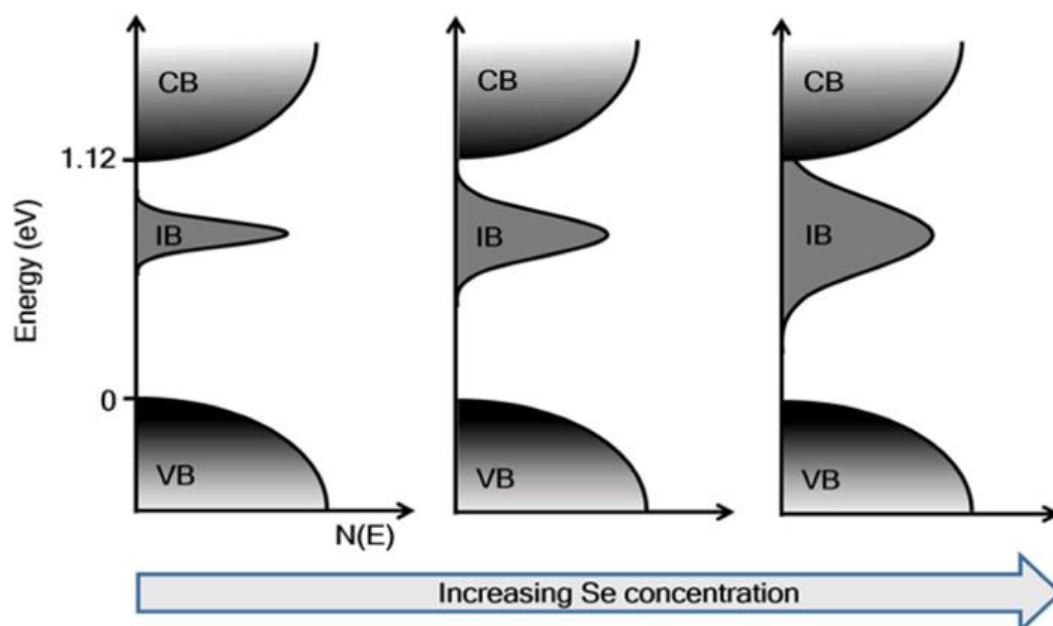


Рисунок 1 – Схематическое изображение плотности состояний в запрещенной зоне кремния, пересыщенного селеном

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Установлено, что наибольший коэффициент поглощения света в ИК-диапазоне при комнатной температуре ( $\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$ ) наблюдается у монокристаллического кремния, пересыщенного на 3-4 порядка концентрации атомами халькогенов (Se, Te) [7,8].

При этом концентрация свободных электронов линейно возрастает с увеличением концентрации примеси, а доля электрически активированной примеси (находящейся в узлах решётки Si) остаётся практически неизменной. Показано, что Si, гиперпересыщенный теллуrom, остаётся стабильным после термообработки при 400 – 500 °С в течение 10 - 20 минут [8]. Следовательно, такой материал может быть использован в рамках современной планарной КМОП технологии производства микросхем.

#### Список литературы

1. Ion- beam synthesis of InAs nanocrystals in crystalline silicon / F. F. Komarov [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.-2008. - Vol. B 266, № 16- P. 3557-3564.
2. Structure and optical properties of silicon layers with GaSb nanocrystals created by ion-beam synthesis / F. F. Komarov [et al.] // Physica Status Solidi. - 2012.- Vol. 209 A, № 1.- P. 148-152
3. Optical and structural properties of silicon with ion- beam synthesized InSb nanocrystals / F. F. Komarov [et al.] // J. Appl. Spectr. - 2017. - Vol. 83, № 6 - P. 959-964.
4. Luminescence of ZnO nanocrystals in silica synthesized by dual (Zn, O) implantation and thermal annealing / I. N. Parkhomenko [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys.-2021. - Vol. 54. - P. 265104 (9 pp).
5. Radiative recombination in zinc blende ZnSe nanocrystals ion – beam synthesized in silica / I. N. Parkhomenko [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys.-2022. - Vol. 55 (20). - P. 205101 (8 pp).
6. Raman monitoring of ZnSe and  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  nanocrystals formed in  $\text{SiO}_2$  by ion implantation / M. Makhavikou [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.-2018. - Vol. B 435. - P. 3557-3564.
7. Structural and optical properties of Si hyperdoped with Te by ion implantation and pulsed laser annealing / F. F. Komarov [et al.] // Vacuum. – 2020. – Vol. 178. – P. 109434 (6 pp).
8. Te- hyperdoped silicon layers for visible- to- infrared photodiodes / F.F. Komarov [et al.] // Technical Physics. – 2022. – Vol. 67, № 15. – P. 2448-2458.

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА NiCoFeCrMn К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Физический факультет Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Исследована радиационная стойкость структурно-фазового состояния высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn к облучению ионами He<sup>2+</sup>. Выявлена высокая стойкость сплава NiCoFeCrMn к облучению ионами гелия при высокой температуре (700°C). Установлено влияние напряжений на стойкость высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn при высокотемпературном облучении.

Из-за низкого уровня выбросов углерода ядерная энергия будет играть более важную роль в энергетической системе будущего. Для дальнейшего повышения энергоэффективности и сокращения образования отходов в начале этого века было предложено несколько концепций ядерно-энергетических систем IV поколения. В отличие от нынешних реакторов, ядерные системы четвертого поколения рассчитаны на работу при более высоких температурах и при больших радиационных повреждениях. Значит, конструкционные материалы будут эксплуатироваться в более жестких условиях. Известно, что при высоких температурах облучения (половина температуры плавления материала или выше) имплантированный гелий формирует пузырьки вдоль границы зерна материала при приложении механического напряжения. Рост и слияние пузырьков, образование газовых полостей на границах зерен в конечном итоге приводит к разрушению материалов (эрозия поверхности), называемого охрупчиванием гелия. Поэтому разработка новых конструкционных материалов, способных выдерживать экстремальные условия воздействия, является перспективной для применения в ядерной энергетике.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) как новый класс металлических материалов, состоящих из четырех или более элементов в равномолярных или почти равномолярных составных частях, в последние годы привлекли большое внимание материаловедов. Благодаря своей сильной стойкости к окислению и многообещающей устойчивости к радиационным повреждениям. ВЭС также были предложены в качестве одного из кандидатов в качестве конструкционных материалов перспективных ядерных систем [1].

В работе исследованы образцы высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn, полученных методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. После чего образцы подвергались отжигу на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150 °С с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Образцы облучались ионами He<sup>2+</sup> с энергий 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Одна часть образцов облучалась при комнатной температуре, а другая – при температуре 700 °С.

Фазовый состав образцов изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV в геометрии параллельного пучка с использованием медного излучения ( $\lambda = 0,15418$  нм). Для исследования только приповерхностной области ВЭС имплантированной гелием, съемка рентгенограмм образцов проводилась при угле падения скользящего рентгеновского пучка 1°.

Исследование морфологии поверхности образцов осуществлялось на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss LEO 1455VP.

Согласно полученным результатам, рентгенограммы всех образцов демонстрируют формирование однофазной системы на основе твердого раствора (Ni,Co,Fe,Cr,Mn) с ГЦК структурой, как видно из рисунка 1.

Выявлено, что облучение ионами гелия как при комнатной температуре, так и при температуре 700°C не приводит к изменению фазового состава ВЭС NiCoFeCrMn, но при этом выявлена уширение и асимметрия дифракционных пиков твердого раствора (Ni,Co,Fe,Cr,Mn), как видно из рисунка 1.

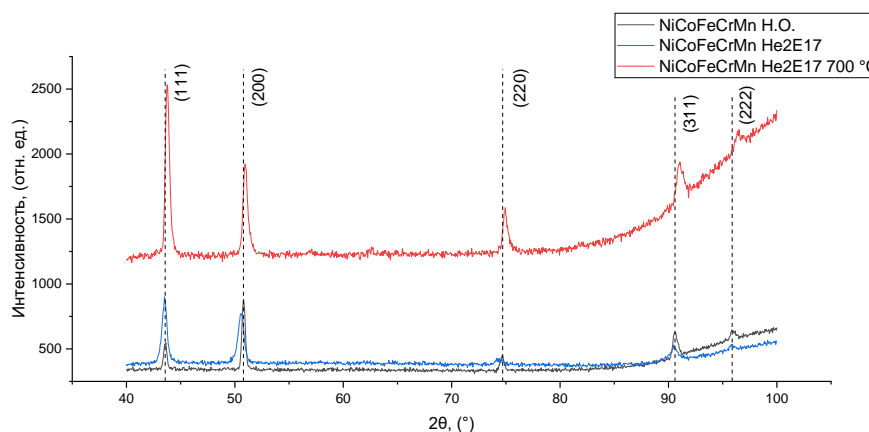


Рисунок 1 – Рентгенограмма исходного сплава NiCoFeCrMn и облученного ионами He<sup>2+</sup> 40 кэВ с флюенсом  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  при комнатной температуре и температуре 700°C

Для определения значений микродеформаций и плотности дислокаций применялся Метод Вильямсона-Холла: графический метод определения размера ОКР и величины микродеформаций, используя график зависимости  $\beta \cos(\theta)$  от  $\sin(\theta)$  в приближении, что функции вклады размера ОКР и микродеформаций описываются функциями Лоренца ( $\beta$  - интегральная ширина линии). При облучении в условиях комнатной температуры мы наблюдаем увеличение значений микродеформации, но при этом напряжения остаются сжимающими. При высокотемпературном облучении гелием значения микродеформаций заметно отличались от облученных при аналогичном флюенсе при комнатной температуре. Поскольку структурно-фазовый состав сохранился при облучении гелием при 700°C, то это указывает на то, что произошел отжиг радиационных дефектов, вследствие чего уменьшились значения напряжений, но при этом они остались сжимающими, что видно из рисунка 2.

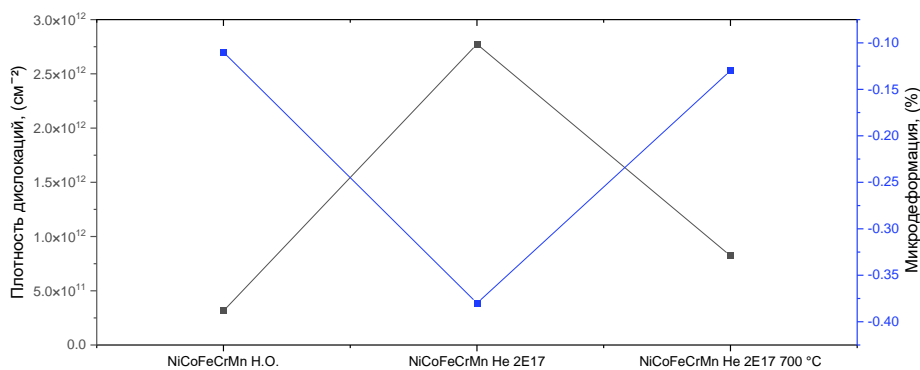


Рисунок 2 – Корреляция между значениями микродеформаций и плотностью дислокаций для NiCoFeCrMn

С атомистической точки зрения (метод функционала плотности) предполагается более высокий энергетический барьер для миграции гелия в ВЭС путем внедрения либо замещения [2], т.е. подавленная подвижность гелия с увеличением сложности состава ВЭС. Подавленная подвижность гелия объясняет высокий уровень напряжений и плотности дислокации в ВЭС NiCoFeCrMn, что связано с повышенной концентрацией гелия и ограниченным объемом его распределения. А значит анализ поведения напряжений и плотности дислокации после облучения позволяет сравнить радиационную стойкость ВЭС. Поскольку на поверхности образцов, подвергшихся высокотемпературному облучению, отсутствовали блистеры можно сделать вывод о структурной стойкости ВЭС NiCoFeCrMn, что видно из рисунка 3.

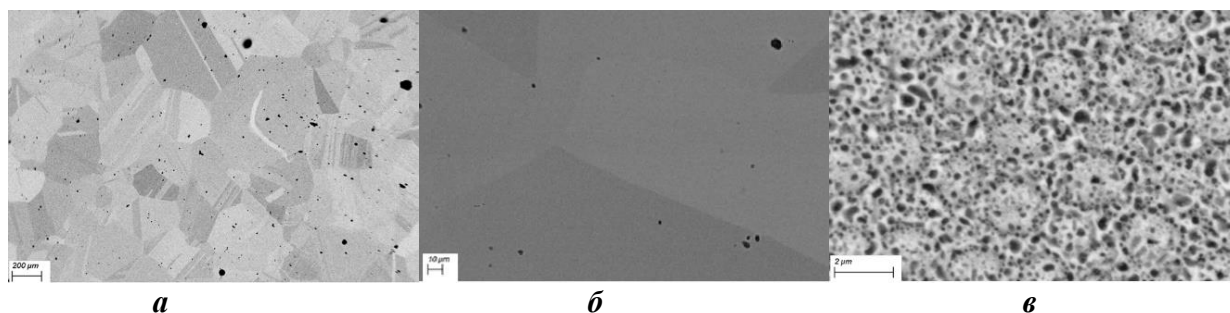


Рисунок 3 – Демонстрация SEM снимков образцов сплава NiCoFeCrMn: не облученных (а), облученных при комнатной (б) и повышенной температуре (в)

Наблюдение с помощью SEM показало равноосную зернистую структуру с несколькими двойниками отжига в сплаве NiCoFeCrMn. Средний размер зерна ВЭС сплава составил 450 мкм, на основе измерений методом пересечения линий.

Известно, что пузырьки гелия в ВЭС NiCoFeCrMn имеют меньший размер, более высокую плотность, более плотное распределение, а также меньшую объемную долю по сравнению с ВЭС NiCoFeCr и никелем [3]. Это указывает на то, что сплав NiCoFeCrMn обладает более сильным сопротивлением образованию пузырьков He. Как правило, накопление гелия и образование пузырьков в металлах контролируются диффузией гелия, на которую влияют условия облучения, такие как температура, скорость повреждения, скорость образования гелия [4,5].

Поскольку растворимость He в металлической системе ограничена [4], имплантированные атомы He будут диффундировать и связываться с вакансиями с образованием пузырьков, а поведение точечных дефектов, включая их подвижность и концентрацию, будет оказывать значительное влияние на поведение He, а также на образование пузырьков. В работе [6] предположили, что химическая неупорядоченность ВЭС будет приводить к распределению энергетических барьеров для точечных дефектов, а перекрытие энергий миграции междоузлий и вакансий будет способствовать рекомбинации дефектов в ВЭС. Это означает, что в ВЭС NiCoFeCrMn будет локально усилена взаимная рекомбинация точечных дефектов, так что концентрация вакансий в нем, вызванная повреждением смещения, будет меньше, чем у NiCoFeCr и Ni.

Таким образом структурно-фазовый состав высокоэнтропийного сплава NiCoFeCrMn является устойчивым к облучению ионами He<sup>2+</sup> с энергией 40 кэВ и флюенсом  $2 \times 10^{17}$  при комнатной температуре и с флюенсом  $2 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup> при температуре 700 °С.

#### Список литературы

1. Kumar, N. A. P. K., Li, C., Leonard, K. J., Bei, H., & Zinkle, S. J. (2016). Microstructural stability and mechanical behavior of FeNiMnCr high entropy alloy under ion irradiation. *Acta Materialia*, 113, 230–244.
2. Zhao S., Chen D., Kai J.-J. First-principles study of He behavior in a NiCoFeCr concentrated solid solution alloy // *Mater. Res. Lett.* –2019. –V. 7, is. 5. –P. 188-193.
3. D. Chen, S. Zhao, J. Sun, P. Tai, Y. Sheng, Y. Zhao, G. Yeli, W. Lin, S. Liu, W. Kai, and J.-J. Kai, “Diffusion controlled helium bubble formation resistance of FeCoNiCr high-entropy alloy in the half-melting temperature regime,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 526, p. 151747, 2019.
4. Trinkaus H., Singh B. Helium accumulation in metals during irradiation – where do we stand? // *Journal of Nuclear Materials*. –2003. –V. 323, is. 2-3. –P. 229–242.
5. Was G.S. *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys*. Springer, 2016.
6. S. Zhao, T. Egami, G. M. Stocks, and Y. Zhang, “Effect of d electrons on defect properties in equiatomic NiCoCr and NiCoFeCr concentrated solid solution alloys,” *Physical Review Materials*, vol. 2, no. 1, 2018.



## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ КРЕМНИЯ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ ПОКРЫТИЙ TiAlSiN, TiAlSiCN

<sup>1</sup>НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Сформированы образцы нитридных и карбонитридных покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN на различных типах подложек. Проведены исследования элементного состава, структуры и морфологии покрытий. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии определен элементный состав покрытий. Методом сканирующей электронной микроскопии изучены их структурные свойства. Структурно-фазовое состояние сформированных покрытий исследовано методом рентгеноструктурного и фазового анализа. Полученные покрытия являются однородными, плотными и не содержат видимых дефектов по всей площади поверхности. Установлено, что уменьшение степени реактивности  $\alpha$  от значения  $\alpha = 0,605$  до величины  $\alpha = 0,421$  приводит к увеличению скорости осаждения нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий на Si подложках (TiAlSiN на 200 – 300 %). Обнаружено, что покрытие TiAlSiN обладает однородной однофазной структурой (Ti, Al)N, представляющей собой неупорядоченный твердый раствор с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК).

**Введение.** Разработка и создание наноструктурированных покрытий, обладающих высокой твердостью, износостойкостью, устойчивостью к воздействию радиационного излучения в настоящее время является одним из важнейших направлений исследований в области материаловедения [1]. Интерес представляет добавление небольшой концентрации 4–8 ат % Si к составу покрытий TiAlN, TiAlCN. Как известно, кремний является мощным аморфизирующим элементом для структуры твердых тел [2]. Кроме того, в малых концентрациях он способен активизировать наноструктурирование формируемого вакуумным методом покрытия.

**Формирование покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN и методы исследования их свойств.** Покрытия TiAlSiN, TiAlSiCN были нанесены методом реактивного магнетронного распыления на различные типы подложек: титан марки BT1-0, нержавеющей сталь марки 12X18H10T, монокристаллический кремний Si (100), монокристаллический кремний с термически выращенным оксидом SiO<sub>2</sub>. Для контроля и управления процессом нанесения покрытий методом реактивного магнетронного напыления использован разработанный модульный комплекс управления расходом газов (МКУРГ) [3]. Формирование осуществлялось в режимах с различной степенью реактивности  $\alpha$  из мишени № 1 (46 ат. % Ti, 46 ат. % Al, 8 ат. % Si) и № 2 (69 ат. % Ti, 23 ат. % Al, 8 ат. % Si). В таблице 1 представлены основные параметры нанесения покрытий.

Морфология и микроструктура полученных покрытий исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа Hitachi SU3400 (Япония) в режиме вторичных электронов с энергией 15 кэВ. Микроскоп был оснащен датчиком рентгеновского излучения (энергодисперсионным спектрометром), позволяющим определять элементный состав исследуемых покрытий методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Рентгеноструктурный и фазовый анализ покрытий TiAlCuN осуществлялся с использованием рентгеновского порошкового дифрактометра ADANI PowDiX 600/300 компании ADANI Systems с фокусировкой по Брэггу-Брентано. Длина волны излучения CoK $\alpha$  составляла  $\lambda = 1,7889 \text{ \AA}$ .

**Результаты и их обсуждение.** На рисунках 1 представлен энергодисперсионный рентгеновский спектр от нитридного покрытия TiAlSiN. Обнаруженная в составе покрытий концентрация кремния (около 8 ат %) примерно совпадает с концентрацией в мишени. Уменьшение степени реактивности  $\alpha$  от значения  $\alpha = 0,605$  до величины  $\alpha = 0,421$  приводит к увеличению скорости осаждения нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий на Si подложках (для покрытия TiAlSiN на 200 – 300 %). На основании анализа результатов

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

СЭМ выявлено, что полученные покрытия являются однородными, плотными и не содержат видимых дефектов по всей площади поверхности.

Таблица 1 – Степень реактивности ( $\alpha$ ), стехиометрия состава, толщина ( $h$ ), скорость ( $v$ ) и время ( $\tau$ ) осаждения нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий на Si подложках

Образец	$\alpha$	Ti/Al	(Ti+Al), ат. %	(N+Si+C), ат. %	(Ti+Al)/(N+Si+C)	$h$ , нм	$\tau$ , с	$v$ , нм/с
1N1.27	0,605	0,67	37,65	57,88	0,650	1170	2520	0,46
1N1.30	0,526	0,73	46,32	48,28	0,959	1370	1860	0,74
1N2.32	0,474	0,66	45,43	48,7	0,933	1320	1560	0,85
2N1.30	0,526	1,92	38,06	57,33	0,664	853	1400	0,61
2N1.30	0,526	2,45	48,12	49,74	0,967	880	1380	0,64
2N2.34	0,421	2,85	51,18	45,07	1,136	823	720	1,14
2CN1.30	0,526	2,51	43,72	51,6	0,847	430	1380	0,31
2CN2.33	0,447	2,94	58,89	36,85	1,598	823	1230	0,67

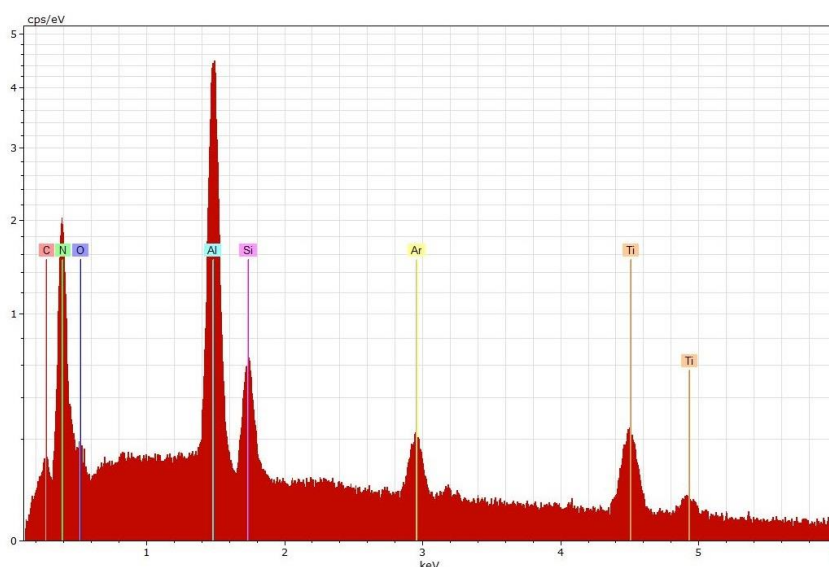


Рисунок 1 – Энергодисперсионный рентгеновский спектр от покрытия TiAlSiN. Образец 1N1.30; подложка – Si;  $\alpha = 0,526$

На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы от нитридных покрытий TiAlSiN, сформированных в различных режимах. На всех дифрактограммах обнаружены пики дифракции от подложки титана Ti VT1-0. Также обнаружены пики дифракции от фазы с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК) типа NaCl (Ti, Al)N (111), (200), (220), (222). Интенсивность пиков от различных кристаллографических плоскостей изменяется в зависимости от степени реактивности  $\alpha$  процесса и мишени № 1 либо № 2, что влияет на элементный состав покрытий. Такое выделение интенсивности рефлекса от отдельной плоскости свидетельствует о текстурированности сформированного покрытия. Было обнаружено, что покрытие TiAlSiN обладает однородной однофазной структурой (Ti, Al)N, представляющей собой неупорядоченный твердый раствор с гранцентрированной кубической решеткой (ГЦК). Наличие диффузного уширения пиков дифракции фазы (Ti, Al)N свидетельствует о нанокристаллической природе покрытий TiAlSiN. Эти пики смещены в область больших углов  $2\theta$  дифракции, относительно чистого нитрида титана. Это свидетельствует о замещении атомов титана атомами алюминия, обладающими меньшим атомным радиусом:  $R_{Ti} = 1,47 \text{ \AA}$ ,  $R_{Al} = 1,43 \text{ \AA}$  [1, 3]. Формирование однофазной структуры обычно наблюдается для покрытий

TiAlN [3] и TiAlCN [2]. Из этого следует, что добавление кремния не изменяет фазовый состав покрытия и не приводит к образованию новых фаз.

Не обнаружено отдельных пиков дифракции от кремния или кремнийсодержащих фаз. В то же время, не выявлено существенного сдвига пиков дифракции, по сравнению с предыдущими результатами для фазы (Ti, Al)N [3], предполагая возможность растворения кремния в нитриде (Ti, Al)N. В этой связи, можно утверждать, что кремний, находясь в аморфном состоянии, сегрегируется вдоль границ кристаллитов и сдерживает их дальнейший рост. Возможность такого процесса была отмечена в [2]. Также кремний может образовывать аморфный нитрид Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> стехиометрического или нестехиометрического состава. Кроме этого, в [2] было показано что кремний забирает на себя паразитные вредные примеси, такие как кислород, связывается с ними в соединения и, таким образом, способствует геттерированию структуры покрытия. Рассчитанный средний размер кристаллитов фазы (Ti, Al)N составил 20–30 ± 5 нм.

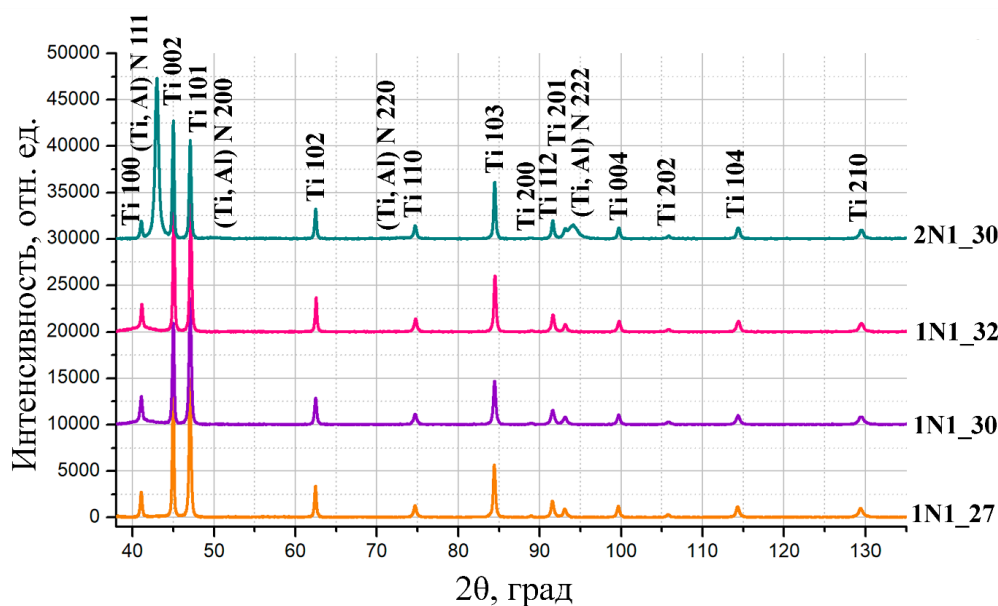


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы от нитридных покрытий TiAlSiN, сформированных на подложках из титана марки VT1-0 (образцы 1N1.27, 1N1.30, 1N1.32, 2N1.30)

**Заключение.** Таким образом, полученные покрытия являются однородными, плотными и не содержат видимых дефектов по всей площади поверхности. Установлено, что уменьшение степени реактивности  $\alpha$  от значения  $\alpha = 0,605$  до величины  $\alpha = 0,421$  приводит к увеличению скорости осаждения нитридных TiAlSiN и карбонитридных TiAlSiCN покрытий на Si подложках. Было обнаружено, что покрытие TiAlSiN обладает однородной однофазной структурой (Ti, Al)N, представляющей собой неупорядоченный твердый раствор с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК). Кремний не формирует выделенных фаз в кристаллическом состоянии, а сегрегируется по дефектам и границам раздела.

#### Список литературы

1. Komarov, F.F Effects of Proton Irradiation on the Structural-Phase State of Nanostructured TiZrSiN Coatings and Their Mechanical Properties / F.F. Komarov, S.V. Konstantinov, V.A. Zaikov, V.V. Pil'ko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – Vol. 94, N. 6. – P. 1609–1618. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02442-2>
2. Cavaleiro, A. Nanostructured Coatings / A. Cavaleiro, J.T.M. De Hosson. – Berlin, 2006. – 648 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-48756-4>
3. Komarov, F.F. Structure and mechanical properties of TiAlN coatings under high-temperature Ar<sup>+</sup> ion irradiation / F.F. Komarov, S.V. Konstantinov, J. Žuk, A. Drożdziel, K. Pyszniak, I.V. Chizhov, V.A. Zaikov // Acta Physica Polonica A. – 2022. – Vol. 142, № 6. – P. 690–696. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.142.690>

## **ПРЕДЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПОДЛОЖЕК GaAs ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СВЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

В работе проведено исследование качества поверхности пластин GaAs на различных этапах технологического маршрута обработки полупроводниковых пластин. Предложена методика предэпитаксиальной обработки пластин GaAs, обеспечивающая требуемое для жидкофазной эпитаксии качество поверхности подложек. Исследованы электронные транспортные свойства РНЕМТ структуры выращенной на обработанной пластине GaAs. Показано, что качество поверхности полученных пластин удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пластинам для выращивания высококачественных гетероструктур СВЧ микроэлектроники.

Микроэлектроника быстро развивается в последние годы, что позволяет создавать все более совершенные электронные устройства. Одним из ключевых факторов, определяющих производительность таких устройств, являются свойства материалов полупроводников, используемых в их изготовлении. В частности, свойства материалов, используемых в качестве подложки для изготовления устройств, могут существенно влиять на их производительность.

В последнее время значительное внимание в микроэлектронике уделяется таким полупроводниковым материалам, как GaAs, GaN, SiC. Каждый из этих материалов обладает уникальными свойствами, которые делают их привлекательными для различных приложений в микроэлектронике [1-3]. При создании СВЧ приборов на основе приведенных полупроводниковых микро- и наноструктур принципиальную роль играет состояние поверхности полупроводника. Обработка поверхности является важным этапом в производстве микроэлектронных устройств. Поверхность подложки часто модифицируют, чтобы улучшить адгезию тонких пленок или способствовать росту определенных структур. Тип используемой обработки поверхности может оказать существенное влияние на получаемую микроструктуру и характеристики устройства [4]. В целом эти исследования демонстрируют важность обработки поверхности при формировании структур в микроэлектронике. Выбор обработки поверхности может оказать существенное влияние на получаемую микроструктуру и характеристики устройства. Вопрос улучшения характеристик контактов с поверхностью подложек, повышения воспроизводимости устройств и их стабильности стоит достаточно остро, особенно при переходе в область субмикронных размеров, что в значительной степени упирается в качество подготовки поверхности и контроля ее в процессе создания прибора.

В связи со сказанным целью предлагаемой работы является исследование состояния поверхности эпитаксиального арсенида галлия, подвергнутого различным вариантам обработки. Исследования поверхности проводились с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе FEI Helios NanoLab 600.

Структуры проходили „стандартный“ технологический маршрут обработки, включающий в себя процессы химико-механического полирования с последующим финишным полированием поверхности подложек. На первом этапе после операции резки слитка, которую проводят алмазными кругами с внутренней режущей кромкой на исходной поверхности пластины (рис 1а.) наблюдается большая концентрация структурных дефектов, формирующих сплошной нарушенный слой на поверхности. При применении стандартных процедур механической шлифовки (рис 1б.) и полировки (рис 2а.) в пластине возникают неконтролируемые механические напряжения, релаксация которых сопровождается перестройкой структурных дефектов и приводит к появлению «захороненного» нарушенного слоя, скрытого в объеме пластины на расстоянии 15-50 мкм от поверхности и негативно влияющего на параметры эпитаксиальных структур, в частности на время жизни неосновных носителей заряда.

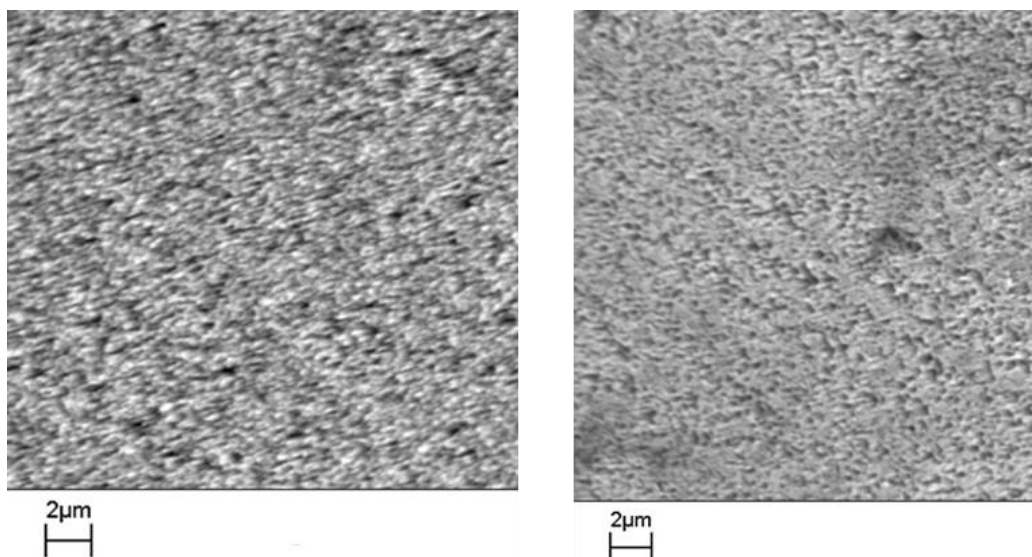


Рисунок 1 – Поверхность пластины GaAs исходная (а) и после механической шлифовки (б)

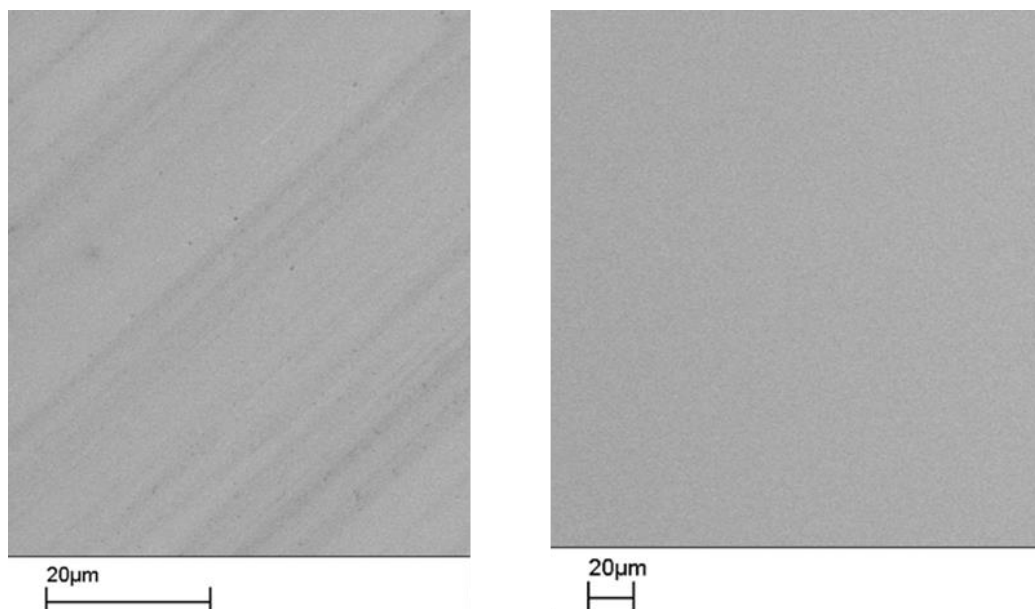


Рисунок 2 – Поверхность пластины GaAs после химико-механического полирования (а) и после финишной обработки (б)

Нами предложено повышение качества обрабатываемой поверхности за счет снижения концентрации структурных дефектов. Это достигается путем обработки подложек ультразвуком. После механического полирования и очистки поверхности на рабочей стороне подложек путем селективного или анизотропного химического травления на глубину нарушенного слоя формируют микрорельеф и обрабатывают подложки ультразвуком в течение 20 мин в деионизированной воде. Затем не позднее, чем через сутки проводят химико-механическое полирование для удаления микрорельефа на рабочей стороне подложек. Результат предлагаемого способа достигается благодаря тому, что возбуждающая упругие волны в кристалле ультразвуковая обработка пластин с развитым микрорельефом, приводит к диссоциации примесно-дефектных комплексов, которые являются эффективными центрами зарождения (конденсации) кластеров при химико-механическом полировании.

Финишная обработка поверхности GaAs в ультразвуковой ванне, дает существенно отличную картину рельефа (рис 2б). Проведенные испытания показали, что все пластины арсенида галлия после полирования имели зеркальную поверхность без рисок и окисной пленки. Рентгеновские исследования подтвердили отсутствие нарушенного слоя после проведения обработки.

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Эффективность предлагаемого способа подтверждают и результаты его практической апробации. На подложках GaAs, прошедших предварительную обработку в указанных оптимальных режимах, выращена слоевая РНЕМТ структура (табл. 1).

Таблица 1

i- GaAs	8 нм
n-Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As	20 нм
$\delta$ -Si	
Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As (спейсер)	5.3 нм
In <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As	10.5 нм
GaAs (буфер 2)	0.33 мкм
Al <sub>0.25</sub> Ga <sub>0.75</sub> As/GaAs СР	25 нм
GaAs (буфер 1)	43 нм
(100) GaAs (подложка)	

Эпитаксиальные слои были сплошными с четкой интерфейсной границей «слой-подложка», что свидетельствует об отсутствии на поверхности подложек стабильных окисных слоев, препятствующих смачиванию раствором-расплавом. Высота микронеровностей поверхности эпитаксиальных слоев не превышала 0,03 мкм, плотность дислокаций составляла около  $10^5 \text{ см}^{-2}$ , что соответствует плотности дислокаций в подложке (табл. 2). Электронные транспортные свойства исследовались на меза-структурах, сделанных при помощи фотолитографии в форме квадратов с вынесенными контактными площадками. Измерения удельного сопротивления и эффекта Холла проводились четырехконтактным способом в геометрии Ван-дер Пау на установке Есориа HMS 5000 при температурах 300 К и 77 К. Различие параметров на меза-структурах не превышает 0,5%.

Таблица 2

№ образца	Тип образца	T=300°K, n, $10^{12}, \text{ см}^{-2}$	T=300°K, m, $\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	T=77°K, n, $10^{12}, \text{ см}^{-2}$	T=77°K, m, $\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
435mz1	РНЕМТ	2.02	7500	1.88	29270
444 mz1	РНЕМТ	2.02	7440	1.88	27450

Таким образом, предложенная методика предэпитаксиальной обработки подложек, позволяет удовлетворить требования, предъявляемые к подложкам GaAs при жидкофазной эпитаксии.

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-технической программы Российского государства «Разработка перспективных базовых технологических процессов получения функциональных материалов, структур, компонентов и модулей для высокоэффективных изделий фотоники в Российском государстве» (Шифр «Компонент Ф»).

#### Список литературы

1. V. V. Emtsev et al. Applied Surface Science, 117-118:617-621, 1997.
2. T. Egawa et al. Applied Physics Letters, 70(17): 2275-2277, 1997.
3. A. Usui et al. Journal of Applied Physics, 47(2): 625-628, 2008.
4. Chen, C. H. et al Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 30(1), 640-645.

## ИММОБИЛИЗАЦИЯ ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНКАХ

<sup>1</sup>Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

В данной работе разработана конструкция макета ферментного биосенсора и определены условия синтеза полимерных пленок на основе бычьего сывороточного альбумина и поливинилового спирта для иммобилизации фермента глюкозооксидазы, применяемого в амперометрических датчиках для определения глюкозы. Проведены исследования полученных биосенсорных структур методом импедансной спектроскопии. Установлены оптимальные режимы для селективного определения концентрации пероксида водорода в биологических жидкостях. Разработанные макеты биосенсоров могут найти применение в медицинской диагностике.

Одной из актуальных задач в современной нанобиотехнологии является разработка новых эффективных средств индикации и диагностики, применяемых в медицине, а также в пищевой и фармацевтической промышленности [1]. Для этих целей широко используются электрохимические сенсоры [2] амперометрического типа, принцип работы которых основан на измерении тока, возникающего в результате электрохимического окисления или восстановления электроактивных веществ. Наиболее распространенными из них являются ферментные амперометрические сенсоры. Например, сенсоры для определения глюкозы в крови широко применяются в медицинской диагностике.

Использование ферментативных методов анализа для количественного определения химических веществ в растворе обусловлено высокой селективностью и точностью идентификации компонент, низкой температурой реакций (не превышающей 37°C). Ферменты способны катализировать превращения веществ с большой скоростью и высокой избирательностью. Однако ферментативные методы анализа имеют некоторые недостатки, обусловленные рядом особенностей ферментов, связанных с потерей их функциональной активности и стабильности под воздействием различных факторов, а также высокой стоимостью из-за невозможности многократного использования растворимых ферментов и сложности их отделения от реагентов и конечных продуктов реакции. Всё это является причиной их однократного применения и, как следствие, высокой стоимости. Для устранения этих недостатков при создании многоразовых диагностических систем применяется иммобилизация ферментов на носителях различной структуры [1].

В данной работе проводилось исследование полимерных пленок на основе бычьего сывороточного альбумина (БСА) и поливинилового спирта (ПВС) для иммобилизации ферментов, применяемых в биоэлектрохимических датчиках определения глюкозы.

Исходя из особенностей реакции окисления глюкозы была разработана конструкция макета ферментного биосенсора (тест-системы). Продуктом окисления глюкозы с участием фермента глюкозооксидазы (ГОД) является пероксид водорода. Окислительно-восстановительная реакция его разложения происходит на платиновом электроде при потенциале от 0,0 до 0,7 В. В результате данной реакции образуются электроны, ток от которых фиксируется при помощи наноамперметра.

В биосенсорах на основе печатных электродов оптимально использование системы электродов со стандартным хлорсеребряным электродом в качестве электрода сравнения. В наших исследованиях наилучшими получились трансдьюсеры, хлорсеребряный электрод в которых получен потенциостатическим трехэлектродным методом в водном растворе 0,1 М HCl при положительном потенциале  $U=0,25$  В на электроде сравнения в течение 10 минут при  $T=18^\circ\text{C}$ . Конструкция макета (**рисунок 1**) представляет собой трансдьюсер с нанесёнными на диэлектрическую (ситалловую) подложку толщиной 0,7 мм электродами, изготовленными послойно методами трафаретной печати, и функциональными ферментными слоями, наносимыми вручную через трафарет. Разрабатываемая тест-система представляет собой индикаторный (рабочий) платиновый электрод площадью 0,7 мм<sup>2</sup> (2) и хлорсеребряный

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

(Ag/AgCl) электрод сравнения (3). Вспомогательным являлся серебряный электрод (1), площадь поверхности которого была почти в 10 раз больше ( $6,2 \text{ мм}^2$ ) площади рабочего электрода. Полученная таким образом химическая трехэлектродная ячейка позволяет с достаточно высокой точностью проводить качественный и количественный анализ компонент в биологических жидкостях с точностью до  $10^{-6}$  моль/л [1].

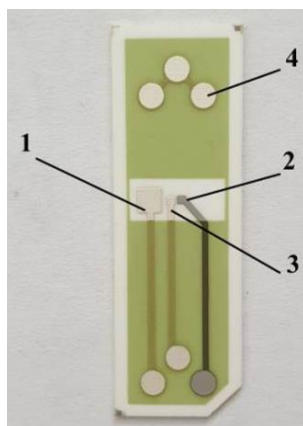


Рисунок 1 – Внешний вид поверхности электродов.

1 – Ag вспомогательный электрод; 2 – Pt рабочий (индикаторный) электрод; 3 – Ag/AgCl электрод сравнения; 4 – группа контактов для идентификации типа диагностической тест-системы.

При формировании биосенсорной системы в качестве биокатализатора использовался ферментный препарат ГОД производства Института микробиологии НАН Беларуси. Так же использовалась смесь ферментов глюкоза-оксидаза с различным количеством каталазы и различной активностью препаратов. В качестве жидкости для исследования использовались системный раствор (на основе фосфатного буфера с хлоридом калия и консервантами) для анализаторов глюкоза/лактата; калибровочные растворы глюкозы – 4, 12, 30 ммоль/л (производства «Эко-сервис», Россия); водный раствор пероксида водорода 3 мг/мл.

Перед нанесением полимерных пленок все электроды обрабатывались берлинской лазурью, которая использовалась в качестве электрокатализатора реакций окисления и восстановления пероксида водорода. Для улучшения адгезии в некоторых образцах использовался аминопропилтриэтоксисилан. Для сшивки свободных групп использовались смесь БСА с глутаровым альдегидом (ГА). Образцы пленок были насыщены ферментом ГОД. В качестве медиатора использовались ферроцианид калия, жёлтая и красная кровяная соль, гидрохинон, ферроцен, берлинская лазурь (БЛ). Пленки наносились ручным способом. Толщина пленок варьировалась от 0,1 до 1 мм. Измерение толщины проводилось интерференционным методом и на профилометре. Так как при температурах  $T \geq 40 \text{ }^\circ\text{C}$  активность фермента ГОД существенно падает, процесс полимеризации пленок проводился при температурах  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для исследования функциональных свойства полученных биосенсорных структур проводились хроно-амперометрические и циклические вольт-амперометрические измерения (импедансная спектроскопия). В процессе проведения электрофизических измерений температура образцов и подаваемых растворов составляла  $35 \dots 37 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Система измерения позволяла селективно распознавать в жидкой биологической смеси пероксид водорода, концентрация которого прямо пропорциональна концентрации глюкозы в растворе. Для определения концентрации глюкозы в произвольном растворе использовалось опорное значение силы тока, возникающего при ферментном окислении глюкозы в стандартном 12 ммоль/л растворе.

Оптимальные режимы для селективного определения концентрации пероксида водорода в биологических жидкостях реализуются при потенциалах электрода сравнения  $U = 0,58 \text{ В}$  и вспомогательного электрода  $U_{\text{ref}} = 0,58 \text{ В}$  относительно рабочего электрода. Увеличение в несколько раз измеряемого тока при введении в раствор пероксида водорода, а также его снижение после промывки системным раствором свидетельствует об активных процессах



разложения пероксида водорода с интенсивным выделением кислорода в установленных режимах (рисунок 2).

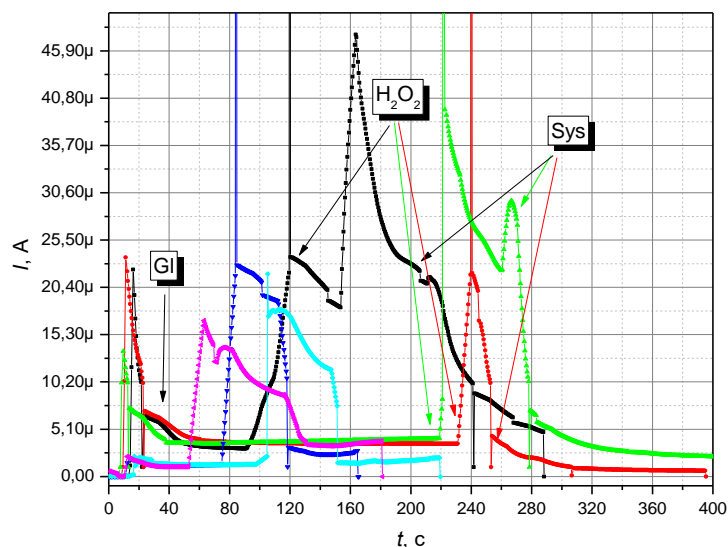


Рисунок 2 – Хроно-амперометрическая зависимость трансдьюсера (электрохимической ячейки) от различных жидкостей в методе проточно-инжекционного анализа:

GI – глюкоза,  $H_2O_2$  – пероксид водорода, Sys – системный промывочный раствор.

На рисунке 3 представлен примеры электрических характеристик полученных образцов полимерных пленок с ферментом. Так, для полимерных пленок на основе БСА и ПВС с сшивкой ГА время размокания после смачивания системным раствором для анализаторов глюкоза/лактата составляет менее 5 минут. При попадании глюкозы на поверхность пленки изменение величины рабочего тока составляет до 300 нА при времени выхода на максимум менее 30 секунд. Данные результаты говорят о высокой скорости прохождения химической реакции ферментного окисления глюкозы.

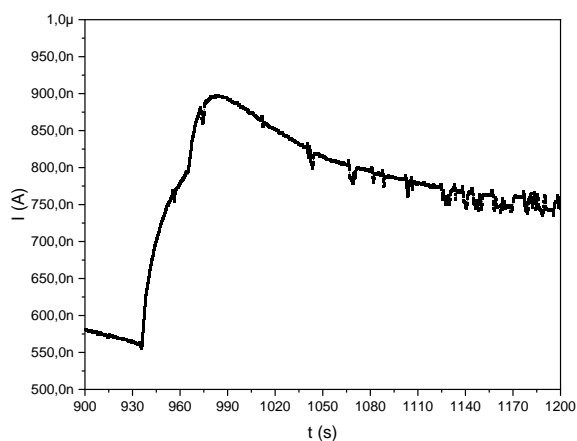


Рисунок 3 – Хроно-амперометрическая зависимость в процессе разложения глюкозы и перекиси водорода в полимерной пленке на основе БСА и на основе ПВС с сшивкой ГА.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований «Биотехнологии – 2» на 2021-2025 годы (Подпрограмма «Микробные биотехнологии-2» НИР 2 задание 3.5, номер гос. регистрации 20211118).

#### Список литературы

1. Андрюков Б. Г., Ляпун И. Н., Матосова Е. В., Сомова Л. М. Биосенсорные технологии в медицине: от детекции биохимических маркеров до исследования молекулярных мишеней (обзор). Биосенсорные технологии в медицине, 2020, №6 (12), С. 70–85.
2. Mikhelson K. N., Peshkova M. A. Advances and trends in ionophore-based chemical sensors. Russian Chemical Reviews, 2015, 84(6), С. 555.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1,5 МэВ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Определены электрические свойства гетероэпитаксиальных пленок InSb на подложках GaAs облученных протонами с энергией 1,5 МэВ с флюенсами  $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ . Установлена радиационная стабильность электрических свойств пленок при облучении флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ . При увеличении флюенса до  $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  происходит увеличение сопротивления пленки в 6 раз, постоянная и потенциал Холла, чувствительность к магнитному полю увеличиваются в 1,5-1,7 раза, подвижность носителей уменьшается до 10 раз. Рассчитанная плотность вакансий в пленке достигает значений  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , что определяет выявленные изменения электрических свойств пленок InSb при облучении флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$ .

Важное практическое применение в твердотельной микроэлектронике, использование в космической индустрии имеет узкозонный полупроводник группы АЗВ5 – антимонид индия. Это обусловлено рекордно высокой подвижностью электронов по отношению к другим полупроводниковым соединениям. Свойства осаждаемых гетероэпитаксиальных пленочных структур антимонида индия на подложках арсенида галлия подобны монокристаллическим структурам и стабильны при низких температурах космического пространства. Такие пленки применяются в микроэлектронных датчиках измерения магнитного поля, тока, угла поворота и других физических величин. Высокоэнергетические частицы космоса (протоны, электроны, ионы) и их взаимодействие с материалами полупроводниковых приборов вызывает множество радиационных эффектов и изменения их свойств. Для успешного применения приборов в космосе необходима их радиационная устойчивость не менее 5 лет. В пределах радиационных поясов Земли воздействие протонного облучения составляет наибольшую долю, энергия протонного облучения находится в интервале 0,5-10 МэВ.

В связи с этим актуальной является цель работы по установлению закономерностей изменения электрических свойств, в гетероэпитаксиальных пленках антимонида индия, температурного воздействия в зависимости от облучения протонов с энергией 1,5 МэВ и флюенсами имитирующих длительное воздействие протонов на околоземной орбите, а также сопоставление изменения электрических свойств с расчетными значениями радиационных повреждений (сна) и концентраций образующихся вакансий в пленке InSb, с использованием программы SRIM.

Для имитации воздействия космического протонного облучения в течении не менее 5 лет были рассчитаны флюенсы протонов  $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  с энергией 1,5 МэВ на основе литературных данных о значении плотности потока протонов на околоземной орбите составляет  $(3 \cdot 10^{11} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1})$  [1]. Поглощенные дозы пленкой InSb рассчитывались с использованием программы SRIM, в соответствии с флюенсами они составили  $3,2 \cdot 10^4 \text{ Гр}$  и  $3,2 \cdot 10^5 \text{ Гр}$ .

Были сделаны оценки радиационных повреждений и концентрации вакансий созданных протонами с энергией 1,5 МэВ в антимониде индия для флюенсов протонов  $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  с использованием программы SRIM и литературных данных энергий смещения атомов In и Sb. Установлено, что под действием протонного воздействия с энергией 1,5 МэВ в пленке антимонида толщиной 2 мкм радиационные повреждения (сна) и концентрации вакансий постоянны по всей глубине с относительным среднеквадратичным отклонением до 20%. Усредненные значения радиационных повреждений и концентрация вакансий в пленках InSb в зависимости от двух значений флюенса составили соответственно:  $(0,02 \text{ и } 0,2) \cdot 10^{-2}$  сна; концентрации вакансий  $(0,05 \text{ и } 0,54) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

Объектом экспериментальных исследований были гетероэпитаксиальные пленки антимонида индия, осажженные на полированные пластины i-GaAs (100) методом взрывного термического испарения, с толщиной 2 мкм. Описание метода, условия осаждения пленок, структура и методики измерения их электрических свойств пленок представлены в работе

[2]. Облучение протонами проводилось в РГП Институт ядерной физики г. Алматы (Казахстан) при энергии 1,5 МэВ с токами пучка протонов в интервале 35–40  $10^{-8}$  А. Значение тока пучка протонов определялось в ходе предварительных экспериментов с целью нагрева столика с образцами не более 60° С при используемых в работе флюенсах протонов.

Далее представлены результаты измерения электрических свойств эпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ и флюенсами протонов  $5 \cdot 10^{14}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> и  $5 \cdot 10^{15}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> (Таблица 1).

Таблица 1 – Электрические свойства (холловское напряжение -  $U_x$ ; постоянная Холла -  $R_x$ ; чувствительность холловского напряжения к магнитному полю -  $\gamma$ , концентрация -  $n$  и подвижность носителей заряда -  $\mu$ ) эпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия, в зависимости от флюенса протонов  $5 \cdot 10^{14}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> и  $5 \cdot 10^{15}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> с энергией 1,5 МэВ. Относительная точность представленных в таблице значений входит в интервал 4÷7%.

Флюенс Н <sup>+</sup> /см <sup>2</sup>	$U_x$ , (10 <sup>-3</sup> В)	$R_x$ , (10 <sup>-5</sup> м <sup>3</sup> Кл <sup>-1</sup> )	$\gamma$ , мВ·Тл <sup>-1</sup>	$n$ , (10 <sup>17</sup> ·см <sup>-3</sup> )	$\mu$ , м <sup>2</sup> ·В <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>
исходный	49,4	2,03	11,1	3,08	1,48
$5 \cdot 10^{14}$	52,1	2,20	11,8	2,90	1,54
$5 \cdot 10^{15}$	74,0	3,50	19,1	1,80	0,15

На рисунке 1 (а) представлены изменения сопротивления (R) и Холловского потенциала ( $U_H$ ) (рисунок 1 (б)) гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ в зависимости от флюенса  $5 \cdot 10^{14}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> и  $5 \cdot 10^{15}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> в зависимости от температурного воздействия на воздухе в интервале температур 25–120 °С.

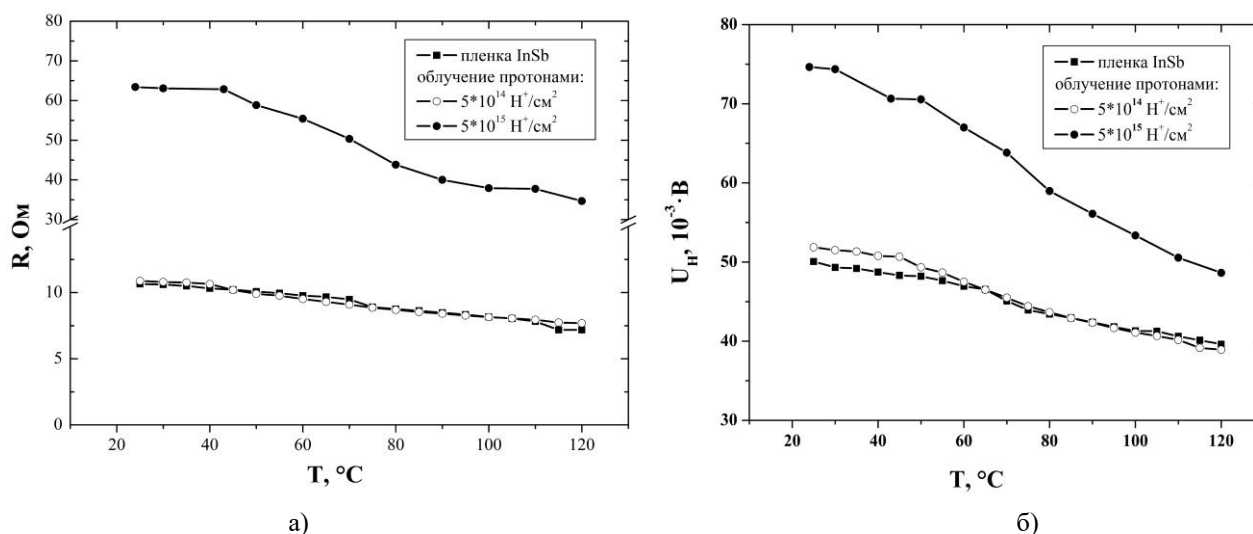


Рисунок 1 – Сопротивление (R) – (а) и Холловский потенциала ( $U_x$ ) – (б) гетероэпитаксиальных пленок InSb до и после облучения протонами с энергией 1,5 МэВ с флюенсами  $5 \cdot 10^{14}$  и  $5 \cdot 10^{15}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> в зависимости от температуры нагрева на воздухе в интервале температур 25–120 °С.

Как следует из представленных данных облучение гетероэпитаксиальных пленок антимонида индия на подложках арсенида галлия протонами с энергий 1,5 МэВ и флюенсе  $5 \cdot 10^{14}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup>, соответствующей поглощенной дозе  $3,2 \cdot 10^6$  рад не приводит к изменению электрических свойств, потенциала Холла, чувствительности к магнитному полю, концентрации и подвижности носителей. Изменение электрических свойств облученных пленок в зависимости от температурного воздействия на воздухе в интервале температур 25–120 °С аналогично необлученному образцу. Такую радиационную стабильность электрических свойств проявляют гетероэпитаксиальные пленки InSb под действием облучения высокоэнергетическими электронами и гамма-квантами при поглощенной дозе  $5 \cdot 10^5$  рад [3,4].

При увеличении флюенса протонов до  $5 \cdot 10^{15}$  Н<sup>+</sup>/см<sup>2</sup> (поглощенная доза  $3,2 \cdot 10^5$  Гр) происходит увеличение сопротивления пленки в 6 раз, постоянная и потенциал Холла, чувстви-

тельность к магнитному полю увеличиваются в 1,5-1,7 раза, подвижность носителей уменьшается до 10 раз. Температурное воздействие до 120° С приводит к уменьшению сопротивления и потенциала Холла, относительное уменьшение электрических свойств находится в интервале 1,4-1,5 раза. Для исходных и облученных малой дозой протонов образцов относительное уменьшение электрических свойств при температурном воздействии составляет близкие величины 1,3-1,4 раза. Если сопоставить эти экспериментальные данные с результатами расчетов радиационных повреждений и концентрации вакансий представленных выше, то основной причиной наблюдаемого изменения электрических свойств пленок InSb под действием флюенса протонов  $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  является, накопление радиационных дефектов, которые устойчивы к отжигу до температуры 120° С. Отметим, что изменение сопротивления, постоянной Холла исследованных пленок InSb под действием протонов с флюенсами  $5 \cdot 10^{14} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  и  $5 \cdot 10^{15} \text{ Н}^+/\text{см}^2$  значительно меньше, чем рост сопротивления и постоянной Холла монокристаллических пластинок InSb облученных протонами с энергией 10 Мэв и подобными флюенсами [5]. Предполагается, что более высокая радиационная стабильность электрических свойств гетероэпитаксиальных пленок InSb по отношению к монокристаллам обусловлена более высокой плотностью стоков и ловушек дефектов, генерируемых при облучении.

Авторы работы выражают благодарность за проведение экспериментов по облучению протонами Горлачеву И.В. – к. физ.-мат. наук, начальнику аналитической группы ускорителя тяжёлых ионов УКП-2-1, Института ядерной физики, г. Алматы, Казахстан.

#### Список литературы

1. Безродных И. П., Тютнев А. П., Семёнов В. Т. Радиационные эффекты в космосе. Часть 3. Влияние ионизирующего излучения на изделия электронной техники. - М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 64 с.
2. Uglov V. V., Drapezo A. P., Kuleshov A. K., Rusalsky D. P., Kolesnikova E. A. Effect of Explosive Thermal Evaporation Conditions on the Phase Composition, Crystallite Orientation, Electrical and Magnetic Properties of Heteroepitaxial InSb Films on Semi-Insulating GaAs (100)// High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes), V. 25, Iss. 1, p. 71-80, 2021.
3. Колесникова, Е. А., Углов, В. В., Кулешов, А. К., Русальский, Д. П., Гуринович, В. А. Радиационная стабильность датчиков, изготовленных на основе n-InSb-i-GaAs // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-ой Международной конференции / БГУ. – Минск, 2021. – с. 530–533.
4. Углов, В. В., Колесникова, Е. А., Кулешов, А. К., Русальский, Д. П., Тетеруков, Е. В. Влияние облучения электронами на электрические свойства гетероэпитаксиальных структур n-InSb-i-GaAs // Четырнадцатый Международный Уральский Семинар «Радиационная физика металлов и сплавов» : тезисы докладов, Кыштым, 25–29 апреля 2022 г. – Кыштым, 2022. – С. 81.
5. Каменская И. В. Электрофизические и тензоэлектрические свойства InSb и GaSb, облученных электронами, протонами и нейтронами : автореф. дис. канд. ф.-м. н. / И. В. Каменская ; Сибирский физико-технический институт; Томский государственный педагогический университет – Томск, 2007. – 23 с.

УДК 539.2

Ласковнев А. П.<sup>1</sup>, Маркевич М. И.<sup>1</sup>, Анисович А. Г.<sup>2</sup>, Журавлева В. И.<sup>3</sup>, Подшивалов Ю. В.<sup>4</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ И ЦИРКОНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

<sup>4</sup>Республиканский центр полярных исследований, Минск, Беларусь

Проведено исследование морфологии поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани 07С11-КВ (Моготекс) с покрытием циркония после пребывания в Антарктиде. Показано, что после испытаний в климатических условиях Антарктиды (3 месяца непрерывного нахождения в естественных условиях антарктического лета 2022 г.) изменяется структура композиционного материала.

Выживание человека в экстремальных условиях зависит от надлежащей одежды, изготовленной из различных материалов. Поэтому разработка одежды для использования в экстремальных условиях является важной и актуальной задачей. В зависимости от климатических условий и условий эксплуатации специальной одежды для конкретных групп людей функциональные свойства материалов также расширяются. Новые технологии оказывают влияние на уровень требований к материалам [1-7]. Если эти материалы соответствуют требованиям окружающей среды (низкие температуры, высокая скорость ветра, высокая влажность и др.), то с природными трудностями можно справиться [8,9].

Целью работы являлось исследование морфологии поверхности смесовой ткани 07С11-КВ с покрытием циркония после воздействия климатических условий Антарктиды.

Ткань 07С11-КВ применяется в широком диапазоне положительных и отрицательных температур, она формоустойчива, мягкая и пластичная, хорошо драпируется. Состав сырья ткани: полиэфир - 67%, вискоза – 33%. Ткань имеет полотняное переплетение.

Покрyтия циркония осаждались на ткань в вакууме с использованием источника стационарной металлической плазмы, работающего в режиме сепарации. Процесс проводился путем чередования периодов работы источника плазмы (1 минута) и паузы для охлаждения ткани (1 минута) [10]. Предварительно перед формированием покрытий поверхность ткани обрабатывалась высокоэнергетическими ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 минут при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере порядка  $3,7 \times 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение 2000 В, ионный ток 20 мА [10]. Образцы разработанного композиционного материала находились в течение 3 летних месяцев 2022 года в условиях Антарктиды. Максимальная скорость ветра составляла 28 м/с, максимальная влажность составляла 99%.

Следует отметить, что данный класс композиционных тканых материалов не является достаточно изученным.

На полимерную основу ткани оказывают влияние УФ – лучи. Энергия излучения в ближней УФ-части спектра достаточна для разрыва ковалентных связей С-Н, С-С, С-О. Кроме того, в полимерах всегда имеются примеси и аномалии в структуре, которые, как правило, поглощают свет и инициируют деструкцию, образование катион-радикала с возрастающей реакционной способностью. Действие агрессивных сред (ветра, влажности) приводит к ослаблению прочностных связей между тканью и наносимым покрытием. Также следует отметить, что покрытие циркония изменяется, происходит его окисление.

В начале окисление обусловлено реакцией ионов циркония с ионами кислорода. Ионы кислорода образуются вследствие адсорбции и затем диссоциации молекул воды на поверхности покрытия. В последующем адсорбция и диссоциация молекул воды происходит уже на

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

поверхности оксидной пленки, проникновение ионов кислорода происходит по анионным вакансиям оксидной пленки к границе раздела и увеличивает толщину оксида. Все эти приведенные факторы, имеющиеся в Антарктиде, так изменяют структуру композиционного материала.

На рисунке 1 представлена морфология данного материала после пребывания в Антарктиде при различных увеличениях.

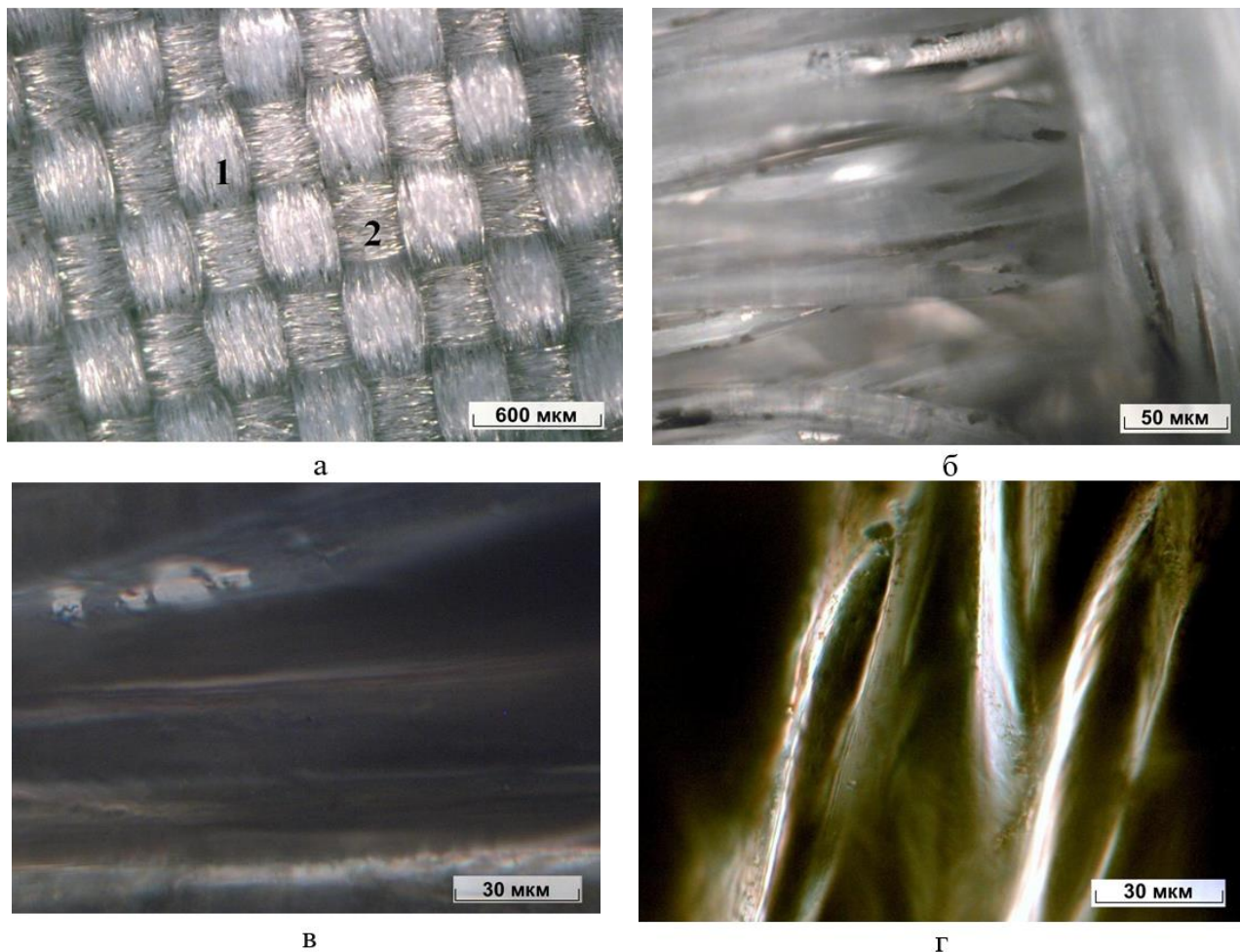


Рисунок 1 – морфология материала после пребывания в Антарктиде при различных увеличениях (а-в) и волокно с покрытием циркония в исходном состоянии (г)

На рисунке 1а представлено полотняное переплетение смесовой ткани (основа композиционного материала), которое придает ей прочность и повышенную жесткость. Под воздействием условий Антарктиды на выступающих участках (позиция 1) ткани наблюдается практически полное удаление покрытия; некоторые его остатки сохраняются на участках, лежащих ниже (позиция 2). Компактность плетения при этом сохраняется. При большем увеличении изображение в темном поле позволяет видеть, что основная масса волокон лишена покрытия (рисунок 1б), фрагменты которого сохраняются на отдельных участках (рисунок 1в). На поверхности присутствуют загрязнения, возможно, техногенного характера. На рисунке 1г для сравнения показаны филаменты ткани с покрытием в исходном состоянии.

Диагностирована морфология поверхности композиционного материала на основе смесовой ткани 07С11-КВ (Моготекс) с покрытием циркония после пребывания в Антарктиде.

Показано, что после испытаний в климатических условиях Антарктиды (3 месяца непрерывного нахождения в естественных условиях) изменяется структура композиционного материала, покрытие устраняется с поверхности практически полностью.

Список литературы

1. Роговина, С.З. Композиционные материалы на основе синтетических полимеров, армированных волокнами природного происхождения / С. З. Роговина, Э. В. Прут, А. А. Берлин // Высокомолекулярные соединения (серия А). 2019. Т.61, № 4. С. 291 - 315.
2. Донецкий, К. И. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов / К. И. Донецкий, А. В. Хрульков // Труды ВИАМ. 2015. № 2. С. 50 - 55.
3. Liu, J. Advances in sustainable thermosetting resins: From renewable feedstock to high performance and recyclability / J. Liu, Sh. Wang, Yu. Peng, J. Zhu, W. Zhao, X. Liu // Progress in Polymer Science. 2021. Vol. 113. P. 101353.
4. Zhang, Q. Bio-based polyesters: Recent progress and future prospects / Q. Zhang, M. Song, Y. Xu, W. Wang, Z. Wang, L. Zhang // Progress in Polymer Science. 2021. Vol. 120. P. 101430.
5. Liu, J. Study on thermal degradation and combustion behavior of flame retardant unsaturated polyester resin modified with a reactive phosphorus containing monomer / Y. Lin, B. Yu, X. Jin, L. Song, Y. Hu // RCS Advances. 2016. Vol. 6. P. 9633 - 49642.
6. Bamane, P. B. Replacement of traditional unsaturated acid by bio-based itaconic acid in the preparation of isophthalic acid-based un-saturated polyester resin / P. B. Bamane, K. K. Wadgaonkar, S. U. Chambhare, L. B. Mehta, R. N. Jagtap // Progress in Organic Coatings. 2020. Vol. 147. P. 105743.
7. Zaghoul, M.Y.M. Developments in polyester composite materials - An in-depth review on natural fibres and nano fillers / M.Y.M. Zaghoul, M.M.Y. Zaghoul, M.M.Y. Zaghoul // Composite Structures. 2021. Vol. 278. P. 114698.
8. Маркевич, М.И. Воздействие импульсного лазерного излучения на базальтовую ткань / М. И. Маркевич, Д. В. Жигулин, В. И. Журавлева, В. Ф. Стельмах, А. М. Чапланов // Полимерные материалы и технологии.-2018.-Т.4.-№3.-с.59-63.
9. Адашкевич, С.В. Морфология поверхности и магниторезонансное поглощение энергии СВЧ пенопластом, обработанного импульсным лазерным излучением / С. В. Адашкевич, М. И. Маркевич, А. Н. Малышко, В. И. Журавлева, В. И., В. Ф. Стельмах, А. М. Чапланов // Полимерные материалы и технологии. - 2018.-Т.4.-№1.-с.59-63
10. Анисович, А. Г. Морфология поверхности, магниторезонансные и антистатические свойства ткани с углеродным покрытием, модифицированным кластерами металлов / А. Г. Анисович, И. П. Акула, А. П. Ласковнев, М. И. Маркевич, Н. М. Чекан //Литье и металлургия. -2020.-№3.-с.79-83.

УДК 535.21

Липатьева Т. О.<sup>1</sup>, Федотов С. С.<sup>1</sup>, Липатьев А. С.<sup>1</sup>, Каратеев И. В.<sup>2</sup>, Сигаев В. Н.<sup>1</sup>

## ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МОНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

В работе продемонстрирована возможность использования метода фемтосекундной лазерной сварки кристаллов YAG и Nd:YAG с созданием соединения с прочностью  $110 \pm 20$  МПа, выдерживающего перепад температур в  $1000$  °С и перспективного для применений в качестве пассивного теплоотвода лазерной среды.

Высокомощные твердотельные лазеры находят широкое применение в современных технологиях: от сенсорики до космических приборов. Однако из-за термооптических эффектов в активной среде мощных лазеров, сложно сочетать высокую мощность с превосходным качеством луча из-за возникающих в ходе работы температурных градиентов, которые приводят к изменению показателя преломления и тепловому линзированию, абберациям и двулучепреломлению [1]. Основным способом эффективного снижения вклада термооптических эффектов в искажение выходного луча и износ активного элемента является организация охлаждения активной среды: обдув, криогенное охлаждение, монтаж теплоотводов и т.д. [2]. Традиционно для монтажа теплоотводов используют технологии диффузионного контакта, который требует высочайшего качества поверхности [2]. Этого недостатка лишен развивающийся в последнее время метод лазерной сварки [3,4], позволяющий осуществлять соединение различных материалов даже с низким качеством поверхности [5]. В настоящей работе с использованием способа фемтосекундной лазерной сварки создано прочное термостойкое соединение активной лазерной среды с теплоотводом, где в качестве теплоотвода служит легированный кристалл YAG, а в качестве активной лазерной среды – Nd:YAG.

Для экспериментов по сварке использовали фемтосекундную лазерную систему Pharos SP (Light Conversion Ltd), генерирующую линейно поляризованные импульсы длительностью  $180$  фс на длине волны  $1,03$  мкм, с энергией импульса  $0,6 - 1$  мкДж и частотой следования импульсов  $500$  кГц. Лазерный пучок фокусировали на контактной поверхности двух свариваемых кристаллов объективом Olympus 20X (N.A. = 0,45) (Рисунок 1б).

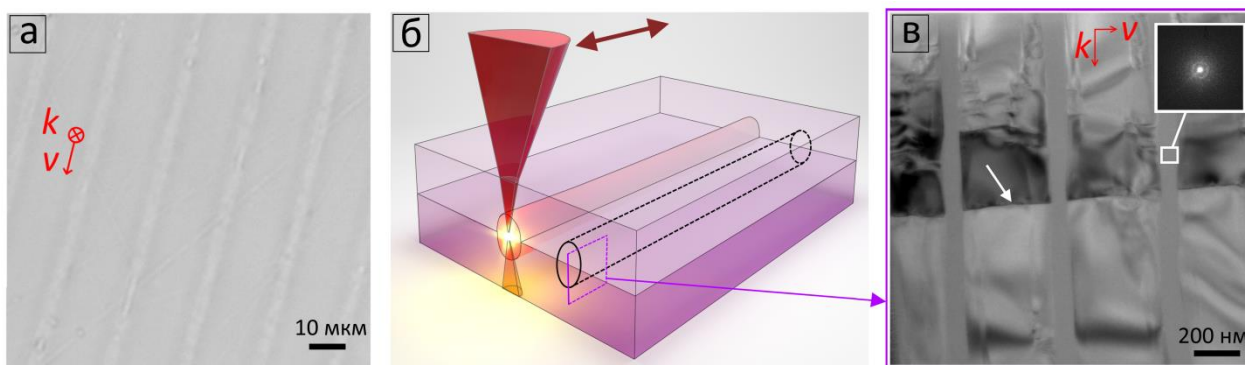


Рисунок 1 – (а) Оптическая микрофотография сварного шва, вид сверху. Красные стрелки показывают направление перемещения  $v$  и распространения лазерного луча  $k$ . (б) Схема фокусировки лазерного пучка. Фиолетовая рамка показывает направление вырезания ламели для просвечивающей электронной микроскопии. (в) ПЭМ-изображение бокового среза сварного шва.

На вставке представлена дифракционная картина выделенной области. Белые стрелки показывают границу соединения двух образцов кристаллов. Красные стрелки показывают направление перемещения  $v$  и распространения лазерного луча  $k$ .



Образец, состоящий из двух полированных кристаллических пластин YAG и Nd:YAG (0,4 at.%), приведенных в частичный оптический контакт, помещали на моторизованную платформу Aerotech ABL1000 без использования прижимного устройства и перемещали относительно лазерного пучка с помощью моторизованной 3D платформы Aerotech ABL1000 со скоростью до 1 мм/с по круговой траектории с расстоянием между сварными швами 10 мкм в направлении, перпендикулярном направлению поляризации лазерного пучка. Для анализа сварных соединений использовали оптический микроскоп Olympus BX51, просвечивающий электронный микроскоп Titan 80-300 (Thermo Fisher Scientific) и испытательную разрывную машину Shimadzu AGS-X. Испытания на термостойкость проводили в ходе резкого нагрева до температур от 400 до 1000 °С и охлаждения на воздухе при комнатной температуре.

Полученные при энергиях импульса до 0,8 мкДж сварные швы представляли собой гладкие однородные треки шириной около 2 мкм без видимых трещин (Рисунок 1а). Дальнейшее повышение энергии импульса приводило к формированию трещин вдоль сварных швов. Благодаря близости коэффициентов термического расширения соединяемых материалов и оптимизации параметров лазерного излучения с целью предотвращения образования трещин при режиме 500 кГц, 0,7 мкДж удалось добиться высокой прочности полученного соединения в пересчете на единицу площади сварной площадки:  $110 \pm 20$  МПа. Исследование методами просвечивающей электронной микроскопии сварного шва, записанного при оптимизированных параметрах лазерного излучения, показало, что сварное соединение обеспечивают периодические наноплоскости толщиной около 100 нм, разделенные кристаллическими областями с периодом около 400 нм (Рисунок 1в). Согласно дифракционной картине, наноплоскости представляют собой аморфизированные области сварного шва (Рисунок 1в). При этом кристаллическая часть сварного соединения содержит нанотрещины, возникновение которых связано с формированием аморфных областей, имеющих больший объем. Соединение, сформированное при данном режиме, способно выдерживать резкий нагрев до 1000 °С с последующим резким охлаждением на воздухе. Данные значения коррелируют с ранее полученными для соединения двух допированных кристаллов Nd:YAG [4]. Несмотря на высокие значения прочности сформированного соединения, сохраняются возможности по её увеличению при дальнейшей оптимизации параметров лазерного облучения, которые позволили бы увеличить ширину аморфных «мостиков», уменьшить их периодичность или формировать полностью аморфный сварной шов.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования метода фемтосекундной лазерной сварки кристаллов YAG и Nd:YAG с созданием прочного термостойкого соединения, перспективного для применений в качестве метода монтажа теплопроводов твердотельных лазеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант РФФ №22-29-00838).

#### Список литературы

1. Frede M. et al. High power fundamental mode Nd:YAG laser with efficient birefringence compensation // Optics Express – 2004. – Vol. 12. № 15. P. 3581
2. Sulc J., et al. Comparison of different composite Nd:YAG rods thermal properties under diode pumping // Solid State Lasers XI – 2002. – Vol. 4630. P. 128
3. Miyamoto I. et al. Advances of laser welding technology of glass-science and technology // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2020. – Vol. 15. №2
4. Lipateva T. O. et al. Robust and adhesive-free joint of Nd: YAG crystals by femtosecond laser-assisted welding // Optics & Laser Technology. – 2022. – Vol. 146. P. 107594.
5. Carter R. M. et al. Towards industrial ultrafast laser microwelding: SiO<sub>2</sub> and BK7 to aluminum alloy // Applied optics. – 2017. – Vol. 56. № 16. P. 4873-4881.

УДК 539.2

Маркевич М. И.<sup>1</sup>, Журавлева В. И.<sup>3</sup>, Анисович А. Г.<sup>2</sup>, Жигулин Д.<sup>4</sup>

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ Ni МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

<sup>4</sup>НПО «Интеграл», Минск, Беларусь

Проведено исследование морфологии наночастиц никеля, полученных в процессе абляции никелевой мишени в водной среде излучением лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10нс, частота следования импульсов 10Гц, энергия одиночного импульса ~ 0,05 Дж). Показано, что в процессе лазерной абляции формируется набор «прямоугольных» наночастиц различного размера. Исследование оптических свойств наночастиц установило наличие нелинейных эффектов в коллоидном растворе наночастиц никеля.

В последнее время интерес к наноматериалам значительно возрастает, что обусловлено существенным изменением их физических свойств по сравнению с массивными материалами. Существенные изменения физических свойств компактного материала наступают при уменьшении размеров его частиц до такого соотношения, когда отношение числа поверхностных атомов к общему числу атомов в частице приближается к значению 0,5 [1,4]. Магнитные частицы играют важную роль в развитии современной электроники и медицины. Магнитные наночастицы просматриваются для записи информации со сверхвысокой плотностью. В 1992 г. значение плотности магнитной записи в жестких дисках составляло 10 Мбит/дюйм<sup>2</sup>, размер бита в плоскости магнитного носителя составляет 800·64нм<sup>2</sup>. В 2001г. была достигнута плотность магнитной записи 100 Гбит/дюйм<sup>2</sup>, что соответствует размеру бита 300·15 нм<sup>2</sup> и дальнейшее повышение плотности записи информации предполагает уменьшение размеров частиц [1-3]. Магнитные свойства наночастиц рассматриваются при создании квантовых компьютеров.

Кроме того, магнитные наночастицы могут быть использованы для решения ряда медицинских задач (адресная доставка лекарств). Основным преимуществом этого метода является малая токсичность лекарств на другие органы человека и возможность удерживать в конкретном месте наночастицы с лекарством при помощи магнитного поля.

Существует достаточное количество методов получения наночастиц, позволяющих весьма точно регулировать размеры частиц, их форму и строение. Особенно эффективны импульсные лазерные методы получения. Лазерные технологии привели к кардинальным изменениям в промышленности. Они основаны на уникальных свойствах лазерного излучения: когерентность, монохроматичность, малая длительность воздействия, высокие плотности энергии в импульсе, отсутствие прямого контакта между материалом и источником энергии, стерильность воздействия.

Контроль формы и размеров при синтезе магнитных структур особенно важен, поскольку они зависят от методов и режимов синтеза наноматериалов и в настоящее время активно развиваются. Несферические наночастицы представляют собой интерес для целей магнитной записи. Частицы вытянутые (в виде прямоугольников, дисков, «иголок») легче поддаются магнитному текстурированию.

Теория синтеза таких частиц не разработана, и еще нельзя считать, что форма магнитных частиц поддается воспроизводимому регулированию.

Цель работы – синтез наночастиц никеля при воздействии лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме, в водной среде, исследование их морфологии и оптических свойств.

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

В качестве мишени использовали поликристаллический никель (длиной 15мм, шириной 10мм, толщиной 10 мм), а в качестве среды, в которой находились мишени, применяли дистиллированную воду. Жидкость принудительно не перемешивали. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10нс, частота следования импульсов 10Гц, энергия одиночного импульса ~0,05Дж).

Образованная в результате испарения материала мишени под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц материала, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции. Образцы Ni обрабатывали лазерным излучением с вложенной энергией 1200 Дж при времени экспозиции 20 мин.

Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе S-4800 (фирма «НИТАСНИ», Япония), исследования оптических свойств проводилось на спектрофотометре «Cary 500» (Varian, США).

На рисунке 1 приведены микрофотографии наночастиц никеля, полученных с помощью СЭМ при различных увеличениях.

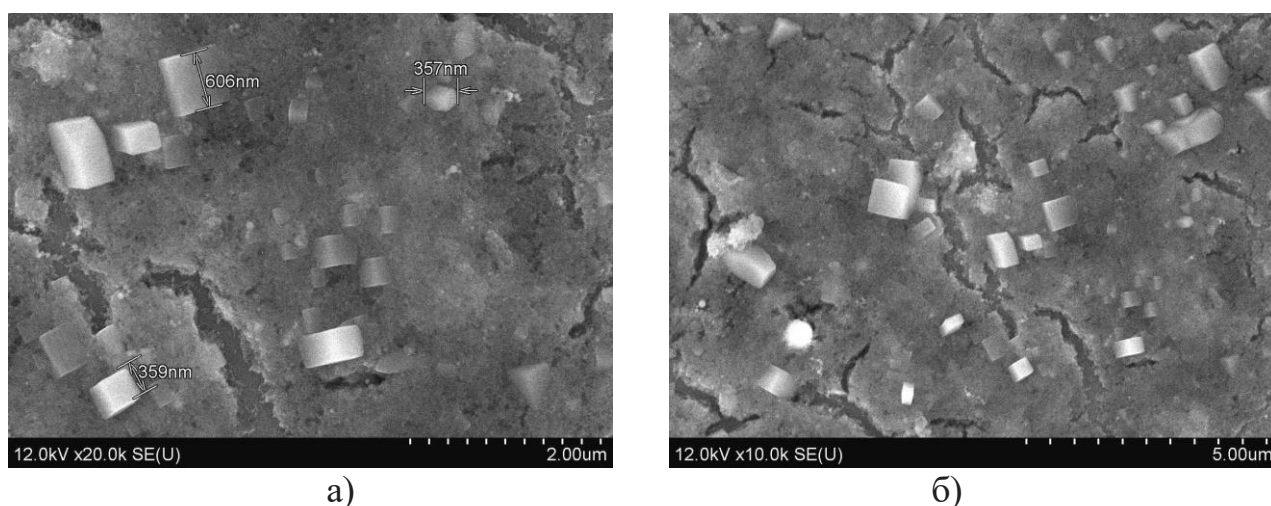


Рисунок 1 – Морфология поверхности наночастиц никеля: время воздействия 20 мин., вложенная энергия 1200 Дж.

На рисунке 1 наблюдаются наночастицы анизотропной формы (несферической). Частицы имеют прямоугольную форму и форму в виде дисков.

Размер некоторой части частиц составляет в примерно 350 нм по ширине и высоте и до 600 нм в длину. Кроме того, наблюдаются и более мелкие наночастицы размером от 20 до 100 нм.

При облучении импульсным мощным лазерным излучением мишени, находящейся в жидкости, в результате нагрева жидкости, окружающей мишень, образуется область перегретого пара и атомов испаренной мишени, образуется кавитационный пузырь, который адиабатически расширяется, схлопывается, образуя твердые наночастицы из материала мишени.

Спектр поглощения наночастиц определяется размерным эффектом – когерентным возбуждением плазменных колебаний электронного газа под действием падающего светового излучения. В силу малых ограниченных размеров частиц такие колебания приводят к возбуждению плазмонов.

Поглощение света наночастицами никеля в зависимости от длины волны приведены на рисунке 2.

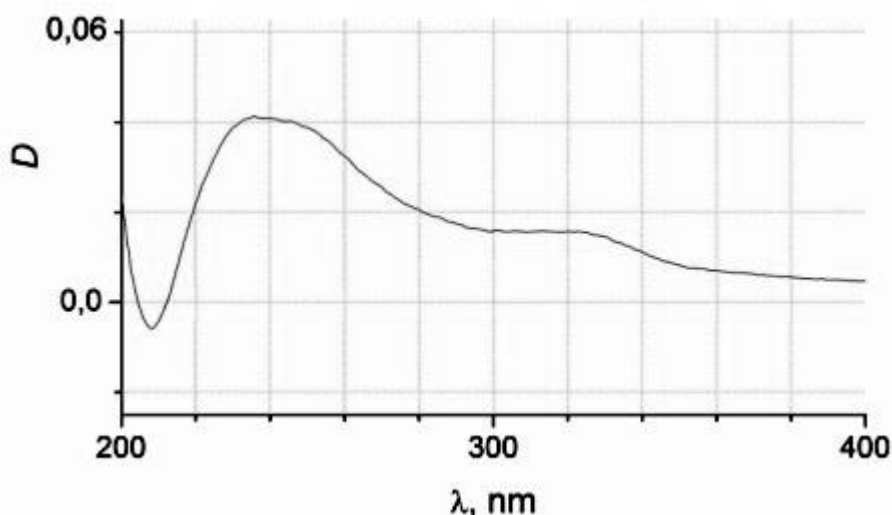


Рисунок 2 – Спектр поглощения света наночастицами никеля

На рисунке 2 наблюдается пик поглощения полученными наночастицами никеля. Резонанс для данной системы наночастиц наступает на длине волны примерно 250 нм. Это явление (полоса поглощения) обусловлено превалированием наночастиц размером примерно до 50 нм.

Проведено исследование морфологии наночастиц никеля, полученных в процессе абляции никелевой мишени в водной среде излучением лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~ 0,05 Дж). Показано, что в процессе лазерной абляции формируется набор прямоугольных наночастиц различного размера, время обработки составляло 20 минут, а вложенная энергия 1200 Дж.

Исследование оптических свойств системы установило наличие нелинейных эффектов в коллоидном растворе наночастиц никеля.

Продемонстрирована возможность контроля процесса абляции и синтеза наночастиц никеля, достигнута эффективная генерация наночастиц для использования в магнитных структурах.

#### Список литературы

1. Губин, С. П. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С. П. Губин, Ю. А. Кокшаров, Г. Б. Хомутов, Г. Ю. Юрков // Успехи химии. - 2005.-Т.74.-№6.- С.539-575.
2. Юрков, Г. Ю. Электрофизические и магнитные свойства наноматериалов, содержащих наночастицы железа или кобальта / Г. Ю. Юрков, А. С. Фионов, Ю. А. Кокшаров, В. В. Колесов, С. П. Губин // Неорганические материалы. - 2007.- т.43.- №8.- С. 936-947.
3. Губин, С. П. Получение, строение и свойства магнитных материалов на основе кобальтсодержащих наночастиц / С. П. Губин, Ю. А. Кокшаров // Неорганические материалы. - 2002.-Т. 38.- №11.-С. 12-87.
4. Анисович, А. Г. Диагностика наночастиц, полученных методом лазерной абляции / А. Г. Анисович, М. И. Маркевич, В. И. Журавлева, Д. Ж. Асанов, А. Б. Камалов // Неразрушающий контроль и диагностика. -2022.-№1.-С. 12-16.

УДК 539.122.04, 621.315.592

Мискевич С. А.<sup>1</sup>, Комаров А. Ф.<sup>1</sup>, Комаров Ф. Ф.<sup>1</sup>, Ювченко В. Н.<sup>1</sup>,  
Ермолаев А. П.<sup>1</sup>, Богатырёв Ю. В.<sup>2</sup>, Заяц Г. М.<sup>3</sup>

## РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики твёрдого тела и полупроводников НАН Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Институт математики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

В работе рассматривается физико-математическая модель радиационного изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии при воздействии потока электронов с энергией 4 МэВ. Предложен метод расчёта радиационного коэффициента изменения времени жизни неравновесных дырок. Проведен расчёт электрических характеристик *p-n-p* биполярного транзистора.

В настоящее время перед предприятиями электронной промышленности стоит задача создания полупроводниковых приборов, имеющих высокую стойкость к воздействию ионизирующего излучения, для применения их на объектах атомной энергетики и в космических аппаратах.

Для снижения материальных и временных затрат активно применяется компьютерное моделирование работы таких приборов при радиационном воздействии ещё на этапе проектирования, поэтому крайне необходимо наличие эффективных моделей и программного обеспечения, описывающих поведение электронных компонентов в широком диапазоне режимов работы, доз и энергий излучения.

В предыдущих работах [1-4] нами были представлены разработанные физико-математические модели расчёта изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии *p*- и *n*-типа проводимости при облучении потоками электронов с энергией до 2 МэВ, нейтронов 1-2 МэВ и гамма-квантов  $Co^{60}$  1,2 МэВ, результаты расчётов распределения носителей заряда по базовой области и электрических характеристик биполярных транзисторов. Был разработан программный комплекс и управляющая программа для ввода/вывода информации.

В настоящей работе было предложено расширение функционала разработанного программного комплекса за счёт добавления в него модуля, содержащего физико-математическую модель для расчёта изменения времени жизни неравновесных носителей заряда в кремнии при воздействии потока электронов с энергией 4 МэВ.

В общем виде зависимость времени жизни неравновесных носителей  $\tau_\Phi$  от дозы  $\Phi$  и типа излучения имеет следующий вид [1]:

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + k\Phi, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент радиационного изменения времени жизни ННЗ,  $\tau_0$  – время жизни до облучения.

С учётом зависимости  $k$  от типа и энергии излучения [5]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \Delta(E)\sigma_c v f(E_t - E_f)\Phi, \quad (2)$$

где  $\Delta(E)$  – вероятность образования центра рекомбинации,  $\sigma_c$  – сечение захвата носителя заряда,  $v$  – тепловая скорость,  $E_t$  – энергетический уровень рекомбинационного центра, введённого облучением,  $E_f$  – уровень Ферми,  $f(E_t - E_f)$  – вероятность захвата ННЗ рекомбинационным центром.

Время жизни входит в уравнение непрерывности неравновесных носителей заряда:

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

$$\frac{\partial p(x)}{\partial t} = -\frac{p(x) - p_n(x)}{\tau_p(x)} + D_p(x) \frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} - \mu_p(x) E(x) \frac{\partial p(x)}{\partial x} - p(x) \mu_p(x) \frac{\partial E(x)}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $\tau_p(x)$  – время жизни ННЗ,  $D_p$  и  $\mu_p$  – коэффициент диффузии и подвижность ННЗ,  $p$  – концентрация ННЗ,  $p_n$  – равновесная концентрация ННЗ. В состав данного уравнения входят диффузионная, рекомбинационная и дрейфовая составляющие. Последняя связана с наличием встроенного электрического поля  $E(x)$ .

Расчёты проводились для  $p$ - $n$ - $p$  биполярного транзистора КТ3107А, разработанного в ОАО «Интеграл». Режим работы активный. Параметры моделирования брались из [6-10]. Экспериментальные данные получены путём облучения образцов на линейном ускорителе ЭЛУ-4 с номинальной энергией электронов  $E_e = 4$  МэВ. Длительность импульсов 5 мкс, частота 200 Гц. Плотность потока электронов  $(5-10) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, флюенс электронов  $\Phi_e = 5 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

На рисунке 1 а) представлена расчётная зависимость времени жизни неравновесных дырок от дозы облучения потоком электронов с энергией 4 МэВ при различных уровнях инжекции в базу (напряжениях на переходе эмиттер-база). На рисунке 1 б) зависимость времени жизни по глубине активной базы для нескольких значений доз облучения электронами.

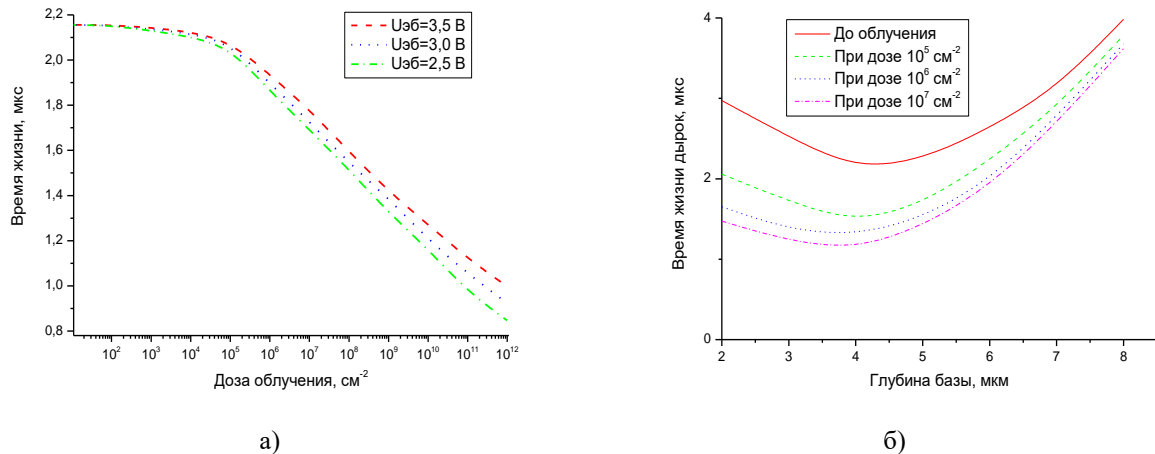


Рисунок 1 – Зависимость времени жизни неравновесных дырок от дозы облучения электронами

На рисунке 2 а) представлены выходные характеристики транзистора для тока базы 800 мкА до и после облучения электронами 4 МэВ дозами  $1 \times 10^{14}$  и  $1 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. На рисунке 2 б) представлена зависимость коэффициента усиления транзистора от дозы облучения электронами 4 МэВ для различных значений тока коллектора.

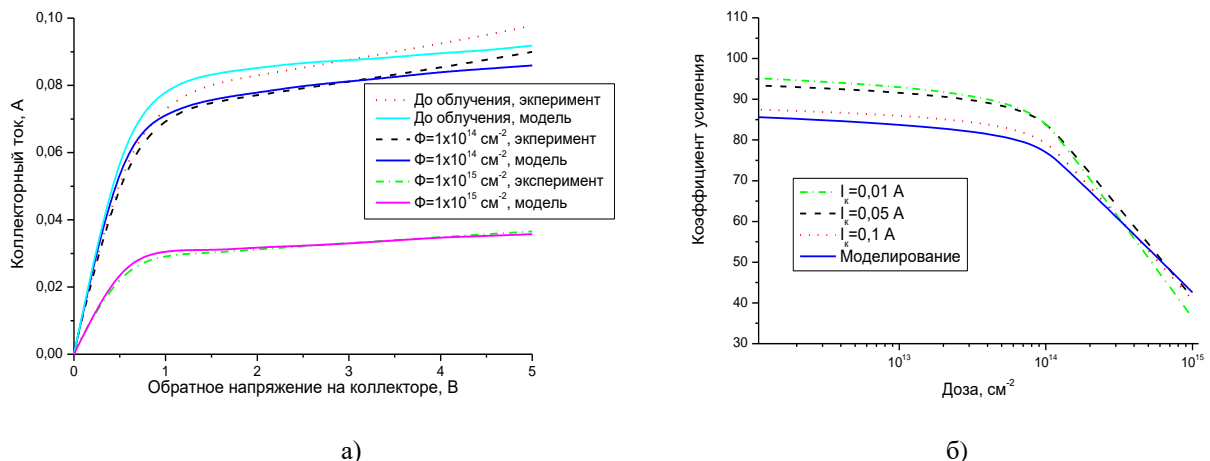


Рисунок 2 – Электрические характеристики транзистора до и после облучения электронами 4 МэВ

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Таким образом, наблюдается значительное снижение электрических характеристик биполярного транзистора при облучении быстрыми электронами 4 МэВ. Результаты расчётов по разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расчётный модуль с разработанной моделью будет включен в программный комплекс по моделированию радиационных изменений рабочих характеристик полупроводниковых приборов.

#### Список литературы

1. Miskiewicz, S.A. Radiation degradation of bipolar transistor current gain / S.A. Miskiewicz, A.F. Komarov, F.F. Komarov, G.M. Zayats, S.A. Soroka // *Acta Physica Polonica A*, 2017, V. 132, P. 288 – 290
2. Мискевич, С.А. Моделирование радиационных эффектов в биполярных транзисторах / С. А. Мискевич, Ф. Ф. Комаров, А. Ф. Комаров, В. Н. Ювченко, Г. М. Заяц // «Прикладные проблемы оптики, радиофизики и физики конденсированного состояния»: материалы VI Междунар. научно-практической конф., г. Минск, 20–21 мая 2021 г. – С. 134–136.
3. Мискевич, С.А. Радиационные изменения рабочих характеристик биполярных транзисторов на кремнии / С.А. Мискевич, А.Ф. Комаров, Ф.Ф. Комаров, В.Н. Ювченко // «Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2022»: материалы II Междунар. Научно-техн. конф., Минск, НАН Беларуси, 21-23 сентября 2022 г. – С. 34 – 40.
4. Мискевич, С.А. Моделирование радиационных изменений рабочих характеристик биполярных транзисторов / С. А. Мискевич, А. Ф. Комаров, Ф. Ф. Комаров, В. Н. Ювченко, А. П. Ермолаев // «Приборостроение-2022»: материалы XV Междунар. научно-практ. конф., Минск, 16–18 октября 2022 г. – С. 341–342.
5. Bertolotti, M. In: *Radiation effects in semiconductors*. Ed. Vook F.L. – New York, Plenum press. – 1968.
6. Иванов, А.М. Влияние облучения электронами и протонами на характеристики поверхностно-барьерных структур SiC-детекторов ядерных излучений / А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, В.В. Козловский, А.А. Лебедев // *Физика и техника полупроводников*, 2008, Т. 42, В. 3, С. 370 – 377.
7. Богатов, Н.М. Влияние радиационных дефектов, созданных низкоэнергетическими протонами при температуре 83 К, на характеристики кремниевых фотоэлектрических структур / Н.М. Богатов, Л.Р. Григорьян, А.И. Коваленко, М.С. Коваленко, Ф.А. Колоколов, Л.С. Лунин // *Физика и техника полупроводников*, 2020, Т. 54, В. 2, С. 144 – 148
8. Naik, K.G. The effect of electron irradiation on BJTs and MOSFETs at elevated temperatures / K.G. Naik, S. Bhat, G. Sangeev // *Arch. Phy. Res.*, 2013, V. 4 (2), P. 74-86
9. Yu, Z. Effects of Electronic Irradiation on the Characteristics of the Silicon Magnetic Sensitive Transistor / Z. Yu, X. Zhao, W. Liu, S. Li, Z. Yang, D. Wen, H. Zhang // *Micromachines*. 2023, V. 14, I. 430.
10. Kulkarni, S.R. High-energy electron induced gain degradation in bipolar junction transistors / S.R. Kulkarni, M. Ravindra, G.R. Joshi, R. Damle // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* 2006, B. 251, P. 157–162

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ КРИПТОНА НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ СИСТЕМЫ V-Nb-Ta-Ti

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Исследовано влияние облучения ионами Krypton на структурно-фазовое состояние многокомпонентного твердого раствора на основе системы V-Nb-Ta-Ti. Показано, что сплав VNbTaTi является высокоэнтропийным и обнаруживает большее значение деформации кристаллической решетки после облучения по сравнению с чистым ванадием. Предложен возможный механизм радиационной стойкости высокоэнтропийных сплавов.

Развитие атомной энергетики по всему миру повышает требования к материалам, используемым в конструкциях, а также к технологиям их производства и контролю за работоспособностью. Под действием такие материалы могут подвергаться структурно-фазовым превращениям, которые негативно влияют на их механические свойства. Для решения этой проблемы перспективным является использование высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), которые состоят из однофазного твердого раствора и большого числа основных элементов в эквимолярных или почти эквимолярных отношениях. Считается, что максимизация конфигурационной энтропии ВЭС способствует формированию однофазного разупорядоченного твердого раствора, что уменьшает риск выпадения сложных интерметаллидных или вторых фаз. Это позволяет получить сплав с простой микроструктурой, которая имеет улучшенные свойства по сравнению с традиционными сплавами. Многочисленные исследования показали, что ВЭС обладают высоким пределом упругости, усталостной прочностью, термической и коррозионной стойкостью, сопротивлением ползучести, радиационной стойкостью, которые связываются с четырьмя основными эффектами: высокой энтропией, большой деформацией решетки, многоэлементностью состава и замедленной диффузией. [1,2]

Многокомпонентные твердые растворы на основе системы V-Ti-Nb-Ta были синтезированы с использованием металлов высокой чистоты (>99,9%) методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. Далее проводился отжиг на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150 °C с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Образцы облучались при комнатной температуре ионами Krypton с энергией 280 кэВ и флюенсом  $1 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>.

Фазовый состав образца изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием медного излучения ( $\lambda = 0,15418$  нм). Для исследования воздействия имплантированного гелия на приповерхностный слой, съемка образцов производилась при малом фиксированном угле падения рентгеновских лучей (1°).

Расчет энергетических потерь был проведен в программе SRIM 2013. На рисунке 1 представлены профили распределения имплантированных ионов Krypton и результаты моделирования радиационного повреждения (измеряемого в смещении на атом, сна). Максимальный пробег ионов криптона составляет 175–200 нм, при этом слой с максимальным повреждением находится на глубине 50–75 нм для ванадия, а для сплава VNbTaTi – 30–50 нм. Наибольшее значение повреждающей дозы составляет 55–105 сна, в зависимости от образцов, так ванадий имеет минимальную повреждающую дозу, а сплав VNbTa максимальную. Концентрация имплантированных ионов Krypton не превышает 1,7–2%.

На рисунке 2 представлены дифрактограммы исходных и облученных образцов, полученные методом РСА. Из представленных дифрактограмм можно сделать вывод, что сплавы имеют высокую степень кристалличности. Для всех многокомпонентных твердых растворов на основе системы V-Nb-Ta-Ti формируется однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой.



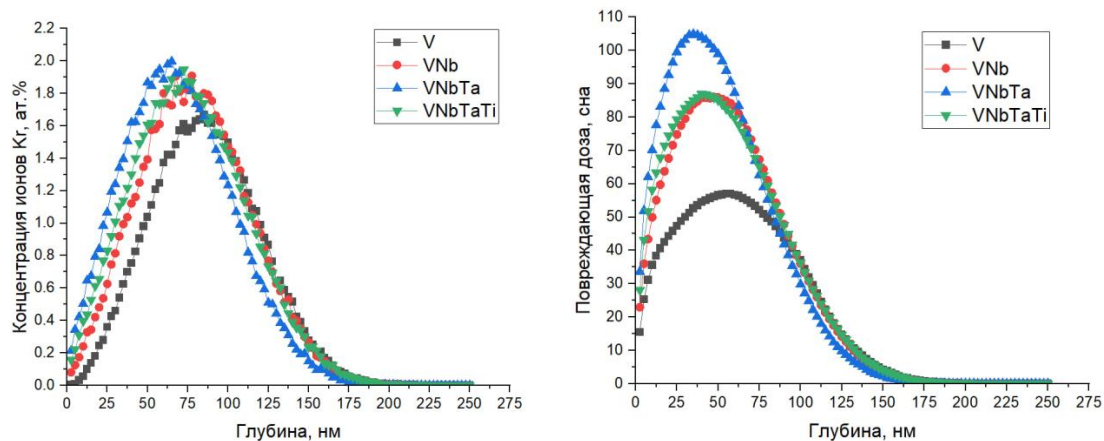


Рисунок 1 – Профили распределения ионов Kr и повреждающей дозы в образцах V, VNb, VNbTa и VNbTaTi по глубине

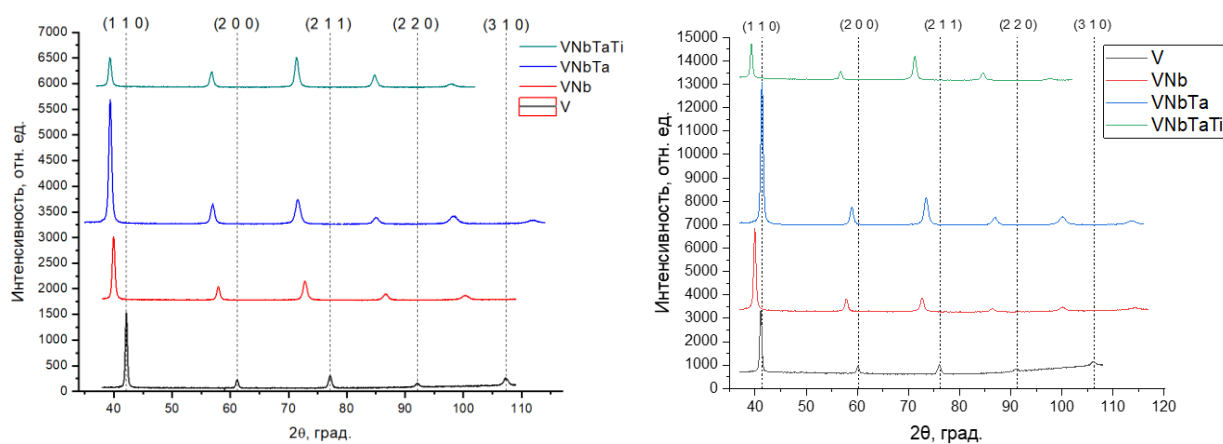


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы исходных и облученных образцов системы V-Nb-Ta-Ti

Параметр решетки для образцов V, VNb, VNbTa, VNbTaTi составил 0,3027 нм, 0,3177 нм, 0,3227 нм и 0,3234 нм соответственно, что согласуется с увеличением среднего атомного радиуса твердых растворов. На дифрактограммах образцов, облученных ионами гелия с энергией 280 кэВ и флюенсом  $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , фазовый состав системы сохранился, однако наблюдается более выраженная асимметрия пиков и их смещение в сторону меньших углов, что указывает на деформацию кристаллической решетки, вызванную облучением.

Для количественной оценки влияния радиационных повреждений на образцы были произведены расчеты остаточных макро- и микронапряжений. На рисунке 3 представлены значения этих напряжений для исходных и облученных образцов. Во всех исходных образцах преобладали сжимающие напряжения. Добавление ниобия и тантала в образцы VNb и VNbTa приводило к еще большему уровню сжимающих напряжений из-за большего атомного радиуса этих элементов по сравнению с ванадием. В сплаве VNbTaTi, благодаря наличию Ti с меньшим атомным радиусом и более низким модулем упругости, наблюдался более низкий уровень сжимающих напряжений.

Облучение ионами криптона приводило к снижению макронапряжений, что может объясняться несколькими причинами. Вероятно, разница в атомном размере между элементами приводит к уменьшению средней длины свободного пробега электронов и фононов, что влияет на энергию образования и барьеры миграции дефектов в материале [3]. Искажение кристаллической решетки может уменьшить подвижность дефектов, поэтому многие межзеренные кластеры оставались в области образования дефектов, что приводило к увеличению скорости рекомбинации дефектов [4,5]. В результате образовалось большое количество межзеренных кластеров малого размера, что вызвало растягивающие напряжения и привело к снижению общего уровня сжимающих напряжений [6]. В микронапряжениях, напротив, наблюдалось увеличение сжимающих напряжений, что может быть связано с радиационно-

стимулированной диффузией более легких элементов к границе области когерентного рассеяния [7].

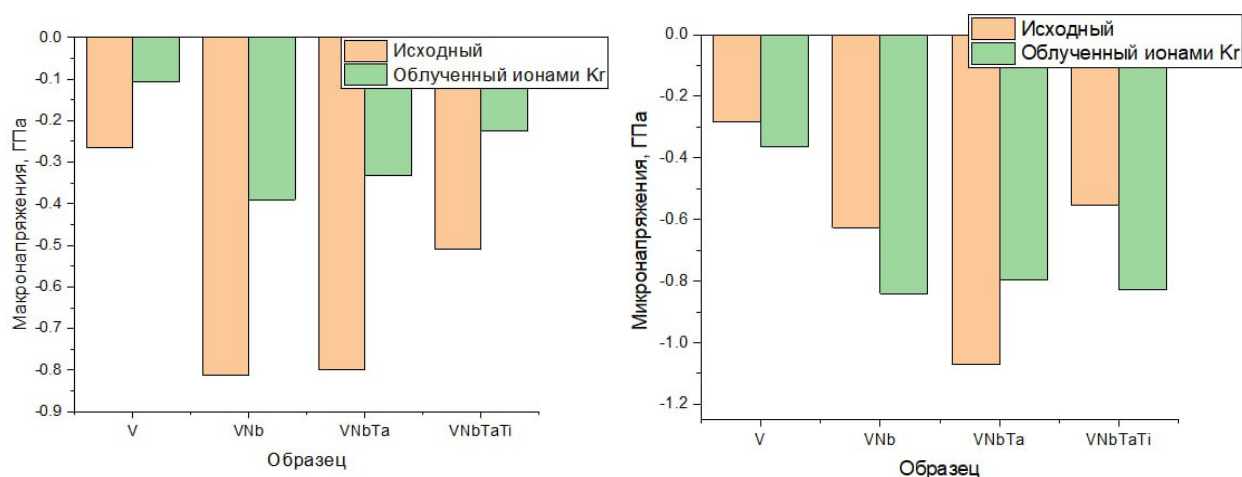


Рисунок 3 – Значения макро- и микронапряжений в исходных и облученных ионами Kr с энергией 280 кэВ образцах системы V-Nb-Ta-Ti

Таким образом, методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией были получены эквиатомные многокомпонентные твердые растворы на основе системы V-Nb-Ta-Ti с ОЦК-решеткой. В исходных материалах были обнаружены сжимающие напряжения, причем добавление Nb и Ta в сплав приводит к увеличению уровня сжимающих напряжений, а добавление Ti приводит к их уменьшению. Облучение ионами криптона приводит к образованию сжимающих напряжений первого рода. В многокомпонентных твердых растворах наблюдается увеличение микронапряжений, которое может быть связано с радиационно-стимулированной диффузией более легких элементов к границам области когерентного рассеяния, что приводит к увеличению микронапряжений за счет размерного фактора.

#### Список литературы

1. High-Entropy Alloys: A Critical Review / Tsai MH, Yeh JW // Mater Res Lett / - 2014. – Vol. 2 – P. 107-123.
2. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, et al. // Progress in Materials Science / - 2014. – Vol. 61 – P. 1-93.
3. Influence of chemical disorder on energy dissipation and defect evolution in concentrated solid solution alloys / Zhang, Y., et al. // Nat Commun / - 2015. – Vol. 6.
4. Effect of solute atoms on swelling in Ni alloys and pure Ni under He+ ion irradiation / Wakai E, Ezawa J, et al. // J. Nucl. Mater. / - 2002. -Vol. 307–311 – P. 367–373.
5. Enhancing radiation tolerance by controlling defect mobility and migration pathways in multicomponent single-phase alloys / Lu C, et al. // Nat Commun / - 2016. – Vol. 7.
6. Evolution of irradiation-induced strain in an equiatomic NiFe alloy / Ullah MW, Zhang Y, Sellami N, Debelle A, Bei H, Weber WJ // Scr. Mater. - 2017. -Vol 140 - P. 35–39.
7. Microstructural stability and mechanical behavior of FeNiMnCr high entropy alloy under ion irradiation. / Leonard KJ, et al. // Acta Mater. / - 2016. -Vol 113 - P. 230-244.

**SUPERRADIANT PARAMETRIC X-RAY EMISSION**

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Independent researcher, Heidelberg, Germany

During the propagating of modulated relativistic electron bunch formed in an undulator of X-ray free electron laser (XFEL) due to the mechanism of self amplified spontaneous emission (SASE) through a crystal located at exit from the undulator, quasimonochromatic X-ray pulse is formed – superradiant parametric X-ray quanta (SPXE) in the case of a resonance between the frequency of parametric X-ray radiation and the frequency of modulation of the electron bunch. The intensity of this pulse is proportional to the square of the number of electrons in the bunch, and its characteristics are comparable with the parameter of the main XFEL pulse directed along the electron velocity. Meanwhile, the pulse of the SPXE will be directed at a large angle to the electron velocity, which expands the applicability of the XFEL.

Parametric X-ray radiation (PXR) is a well-known mechanism of radiation of charged particles propagating in a periodic medium [1]. Its qualitative properties are the emission of quasimonochromatic X-ray beams at a large angle to the electron velocity and the possibility of continuous tuning of the radiation frequency by simple rotation of the crystal. We consider that the charged particles are a bunch of electrons emitted from the XFEL channel. Due to the SASE mechanism, the electron bunch, whose density was initially uniformly distributed, is transformed into a sequence of minibunches, which leads to spatial modulation of the electron density with a period  $d_0$ . Subsequently, when the bunch propagates inside the undulator, coherent radiation is formed with a frequency  $\omega_0 = 2\pi/d_0$  and intensity proportional to the square of the number of electrons in the bunch. Coherent radiation propagates in a small cone along the electron velocity. The resonance between the bunch modulation frequency and the emitted photon frequency occurs automatically, since the beam modulation and the emission frequency are determined by the same undulator radiation mechanism.

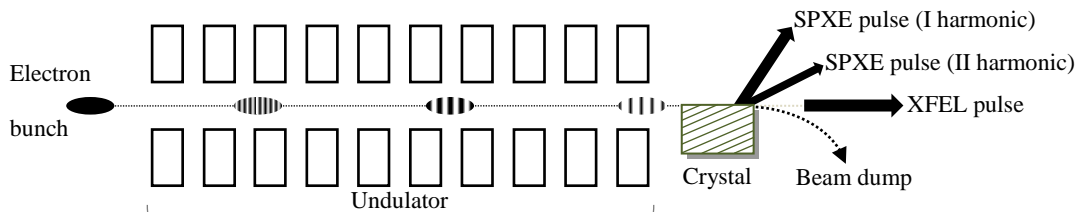


Figure 1 – Qualitative scheme of the processes leading to the generation of SPXE pulses in the XFEL channel.

Now let us consider the case of SPXE, when we assume that the electron bunch is modulated in density inside the undulator and at the end of the exit hits the crystal target (Figure 1), where PXR is generated with a frequency  $\omega_B$  depending on the crystal structure and the angle  $\theta_B$  between the crystallographic planes and the electron velocity. The angle  $\theta_B$  can be chosen such that the resonance condition  $\omega_0 \approx \omega_B$ . As a result, in addition to the main XFEL pulse, the SPXE pulse will be generated with intensity proportional to the square of the number of electrons in the bunch and directed at a large angle to the electron velocity direction. The characteristics of the SPXE are comparable with the parameter of the main pulse of the XFEL, and the higher harmonics of the SPXE can be used to generate pulses of harder X-ray radiation without requiring a change in the energy of the electron bunch.

A simple and effective method for describing the electromagnetic processes of relativistic charged particles interacting with a medium, namely the method of equivalent photons (pseudophotons, the Weizsäcker-Williams approximation) is used to analyze the SPXE according to its qualitative estimation. Accordingly, the intrinsic field of a relativistic charged particle is equivalent in its

characteristics to a beam of pseudophotons. In the frequency range much lower than the particle energy  $E$ , i.e.  $\omega \ll E$ , the spectrum of pseudophotons can be obtained by the classical description [2]. Maxwell equations will take the following form:

$$\square \vec{A} = -4\pi e_0 \sum_a^N \vec{v}_a \delta(\vec{r} - \vec{v}_a t - \vec{r}_a) \quad (1)$$

$$\square \varphi = -4\pi e_0 \sum_a^N \delta(\vec{r} - \vec{v}_a t - \vec{r}_a) \quad (2)$$

wher  $\square$  – d'Alembert operator, the sum applies to all particles, each of which is in the initial position  $\vec{r}_a$  and has the velocity  $\vec{v}_a$ .

Using the Fourier transform, one can calculate the electromagnetic fields  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  and  $\vec{H}(\vec{r}, t)$ . The projection of the electromagnetic field energy flux on the x axis along the average velocity  $\vec{v}$  is determined by the following expression [3]:

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dz dy dt [\vec{E}\vec{H}]_x = \int_{-\infty}^{\infty} dx dy dt [\vec{E}_{\perp}]^2 \\ &\approx \frac{e_0^2}{2\pi^2 v} \sum_a \sum_b \int d\vec{k} \frac{(\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_a k_x)(\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_b k_x) e^{i\vec{k}(\vec{r}_b - \vec{r}_a)} e^{ix\vec{k}(\vec{v}'_a - \vec{v}'_b)}}{[k_x^2 \gamma^{-2} + (\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_a k_x)^2][k_x^2 \gamma^{-2} + (\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_b k_x)^2]} \end{aligned} \quad (3)$$

where relativistic gamma factor of the particle  $\gamma = E/m$ , photon with frequency  $\omega$  and wave vector  $\vec{k} = (\omega\vec{v}/v, \vec{k}_{\perp})$ , the angle  $\theta_a$  determines the small angular divergence of the electron bunch, so that  $\vec{v}_a = \vec{v} + \vec{v}'_a$ ;  $\vec{v}'_a \ll \vec{v}$ .

This projection can be split into the sum of two parts:

$$\Pi = \Pi_{sp} + \Pi_{coh} \quad (4)$$

The incoherent (spontaneous) flux  $\Pi_{sp}$  corresponds to the case when the indices are the same, i.e.,  $a = b$

$$\begin{aligned} \Pi_{sp} &= \frac{e_0^2}{2\pi^2 v} N \int d\vec{k} \frac{k_{\perp}^2}{[k_x^2 \gamma^{-2} + k_{\perp}^2]^2} = \int \omega n_{sp}(\omega) d\omega ; \\ n_{sp}(\omega) &= N \frac{2e_0^2}{\pi\omega} \ln \frac{m\gamma}{\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

The coherent part  $\Pi_{coh}$  is given by the following expression:

$$\begin{aligned} \Pi_{coh} &= \frac{e_0^2}{2\pi^2 v} \int d\vec{k} |\vec{F}(\vec{k})|^2, \quad \vec{F}(\vec{k}) = \sum_a^N \frac{(\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_a k_x)}{k_x^2 \gamma^{-2} + (\vec{k}_{\perp} - \vec{\theta}_a k_x)^2} e^{-i\vec{k}\vec{r}_a} e^{ix\vec{k}\vec{v}'_a}; \\ n_{coh}(\omega) &\approx \frac{N^2 e_0^2}{2\pi\omega v^2} \frac{d_0^2}{L_b^2} [-e^{a^2 \gamma^{-2}} Ei(-a^2 \gamma^{-2})(1 + a^2 \gamma^{-2}) - 1] \left| \frac{1 - e^{iL_b \omega/v}}{1 - e^{id_0 \omega/v}} \right|^2 \exp \left[ -\frac{\omega^2 \sigma_c^2}{2v^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

where  $d_0$  – the oscillation period of the modulated bunch of length  $L_b = Kd_0$ , parameter  $\sigma_c \ll d_0$  determining fluctuations of the oscillation period, and the number of the minibunches  $K \gg 1$ .

Let us compare the contributions of the coherent  $N_{coh}$  and incoherent  $N_{sp}$  parts with the chosen parameters as follows: the typical electron energy  $E = 6.7 \text{ GeV}$ ;  $\gamma = 13111$ . Parameters  $\sigma_a = 10^{-4}$  and  $\sigma_b = 2 \times 10^{-5} \text{ cm}$ , the parameter  $a^2 \gamma^{-2} \approx 0.2$ . Let the bunch charge  $Q = 0.2 \text{ nC}$ , which corre-

sponds to  $N = 1.2 \times 10^9$  electrons. The duration of the photon pulse can be chosen equal to 25 fs, which corresponds to the length of the modulated bunch  $L_b = 8.3 \times 10^{-5}$  cm and the modulation period  $d_0 = 10^{-8}$  cm with the parameter  $\sigma_c = 10^{-9}$  cm. Figure 2 shows the incoherent and two harmonics of the coherent spectral density of pseudophotons of the modulated bunch with these parameters [4].

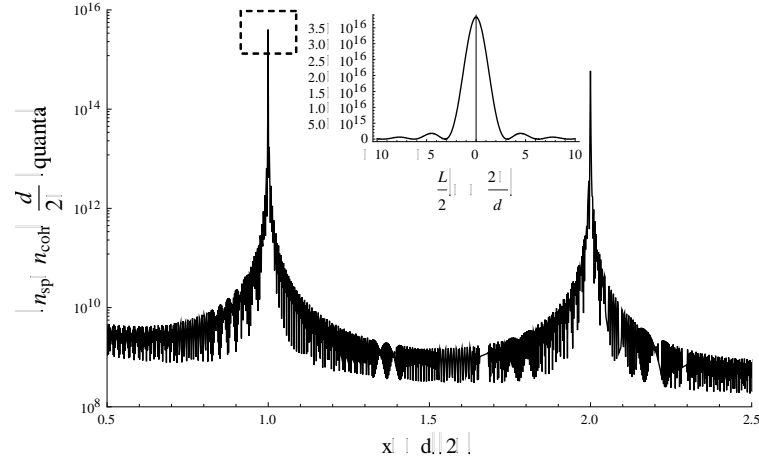


Figure 2 – The incoherent and two harmonics of the coherent pseudophotons spectral densities.

Finally, the typical frequency spread for the XFEL pulse  $\Delta\omega / \omega_0 \approx 10^{-3}$  and the frequency  $\omega_0 = 6.28 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$ . Thus, we can estimate the number of incoherent photons:  $N_{sp} = n_{sp}(\omega_0) \Delta\omega = 1.1 \times 10^5$ , this number is significantly less than the corresponding number of photons emitted by the XFEL pulse. At the same time, the number of coherent photons near the resonant frequency  $\omega_l = 2\pi l / d_0$ :  $N_{coh} \approx 5.9 \times 10^{11}$  this number is comparable to the number of photons in the undulator XFEL pulse. In addition, the number of pseudophotons corresponding to the second harmonic ( $l = 2$ ) is 10 times less.

We have shown that SPXE results from the reflection of coherent pseudophotons from crystallographic planes [4]. The frequencies of these pseudophotons are located near the resonance frequency  $\omega_0 = 2\pi / d_0$ .

$$N_{SPXQ} \approx \frac{\pi}{2 \sin 2\theta_B} R \frac{\Delta\theta_B}{\Delta\theta_{ps}} N_{coh}; \quad \Delta\theta_B \approx (\omega_0 L)^{-1}, \quad (7)$$

where  $\Delta\theta_{ps}$  – angular spread of pseudophotons. Thus, real photons are emitted at a large angle  $2\theta_B$  to the electron velocity. Then, by choosing the orientation of the crystal, photons can be directed to any desired location. This makes it possible to obtain additional experimental windows in XFEL experiments.

#### Reference

1. Coherent x-rays at MAMI / W. Lauth, H. Backe, O. Kettig, P. Kunz, A. Sharafutdinov, and T. Weber // Eur. Phys. J. A. – 2006. – Vol. 28, № S1. – P. 185–195.
2. Akhiezer, A. I. Quantum Electrodynamics / A. I. Akhiezer and V. B. Berestetskii. – Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy, Interscience, New York, 1965.
3. Feranchuk, I. D. Method of the equivalent photons for modulated electron beam / I. D. Feranchuk, O. D. Skoromnik, Nguyen Quang San // Journal of the Belarusian State University. Physics. Physics. – 2020. – № 3. – P. 24–31. Russian.
4. Feranchuk, I. D. Superradiant parametric x-ray emission / I. D. Feranchuk, N. Q. San, and O. D. Skoromnik // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2022. – Vol. 25, № 12. – P. 120702 (12 pp.).

УДК: 539.23, 539.266

Нуждин А. Д.<sup>1</sup>, Волков Ю. О.<sup>1</sup>, Рощин Б. С.<sup>1</sup>, Асадчиков В. Е.<sup>1</sup>, Тихонов А. М.<sup>2</sup>

**ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
МЕТОДА РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ  
В ИССЛЕДОВАНИИ ЧАСТИЧНО УПОРЯДОЧЕННЫХ  
МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПЛЁНОК НА ЖИДКОФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА**

<sup>1</sup>Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»  
РАН 119333, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, 119334, Москва, Россия

Предоставлен краткий обзор проведенных исследований многослойных структур фосфолипидов на поверхности гидрозоля и границ раздела жидкость-жидкость методом рентгеновской рефлектометрии. Сопоставлены достоинства и недостатки применения для этих целей лабораторных и синхротронных источников. Показано, что в ряде экспериментов эти методы позволяют получить результаты на лабораторном источнике, качественно сопоставимые с измерениями на синхротронных источниках. Описана проблема применения лабораторных источников для исследований структуры границ раздела жидкость-жидкость.

Метод рентгеновской рефлектометрии хорошо зарекомендовал себя в области исследований границ раздела и наноразмерных тонких пленок и стал незаменимым инструментом при их комплексном изучении в жидкой среде, о чем говорит значительное увеличение количества публикаций в данном направлении за последние годы. Метод основан на анализе угловой зависимости зеркального отражения рентгеновского излучения от исследуемой структуры и позволяет определить пропорциональное плотности распределение действительной части диэлектрической проницаемости по глубине образца с разрешением на уровне до 1 Å. Общее описание метода можно найти в работе [1]. Применительно к частично упорядоченным пленочным структурам для интерпретации результатов перспективно использование модельно-независимого подхода, не требующего априорных предположений о структуре исследуемого объекта [2].

Одним из наиболее значимых применений рентгеновской рефлектометрии в изучении жидкофазных интерфейсов стало исследование пленок фосфолипидов, представляющих интерес в первую очередь в биофизике, в качестве простейших моделей клеточных мембран, а также в физике конденсированного состояния в рамках изучения границ раздела и фазовых переходов, что обусловлено возможностями их применения в современной органической химии и нанотехнологии. Существует несколько подходов к получению фосфолипидных пленок, наиболее распространённым является их формирование на подготовленных подложках методом Ленгмюра-Блоджетт, накладывающим ряд ограничений на структуру и состав формируемой пленки [3]. Использование в качестве подложек кремнезёмных гидрозолей открыло новые возможности – их поверхность обладает специфичными граничными условиями, приводящими к упорядочиванию фосфолипидов с образованием мульти- и бислоев [4]. С помощью рентгеновской рефлектометрии для такой системы прослежен процесс упорядочения мультислоя из бислоев фосфолипида DSPC на кремнезёмной подложке [5], и уточнены параметры структуры пленок фосфолипидов DPPC и DSPC [6]. Другой интересной возможностью стало изучение температурных фазовых переходов фосфолипидов. Для этих целей была разработана и сконструирована специальная термостатная камера [7]. С её использованием было исследовано изменение структуры упорядоченных многослойных ламеллярных плёнок фосфолипидов DSPC и DMPS, сформированных на поверхности коллоидного раствора кремнезёма, в ходе термотропного фазового перехода плавления [8].

Проведение измерений на жидкостях накладывает ряд требований к оборудованию и параметрам зондирующего излучения, одно из которых — неподвижность поверхности образца с одновременным независимым перемещением зондирующего пучка и детектора вокруг нее, что существенно усложняет конструкцию оптической системы. Для данного типа экспериментов использование синхротронных источников влечет как преимущества, так и недо-

статки. Прежде всего, высокая яркость позволяет получать кривые отражения с большим порядком падения интенсивности, что имеет важное значение для дальнейшего восстановления структурных данных. Также за счет яркости синхротронный источник имеет большую производительность, требуется меньше времени для измерения, что позволяет изучать динамику быстрых процессов. К недостаткам можно отнести радиационное повреждение исследуемой структуры вследствие высокой лучевой нагрузки, и что также существенно, меньшую доступность по сравнению с лабораторными источниками. В то же время тип конструкции лабораторного рентгеновского дифрактометра [9], применительно к измерению жидкофазных поверхностей, по ряду параметров качественно сопоставим с синхротронными станциями II и III поколений. В некоторых случаях данные, независимо полученные на синхротроне и лабораторном источнике, систематизировались, проверялись на воспроизводимость, и при сопоставлении [10] показывали хорошее взаимное соответствие (рисунок 1).

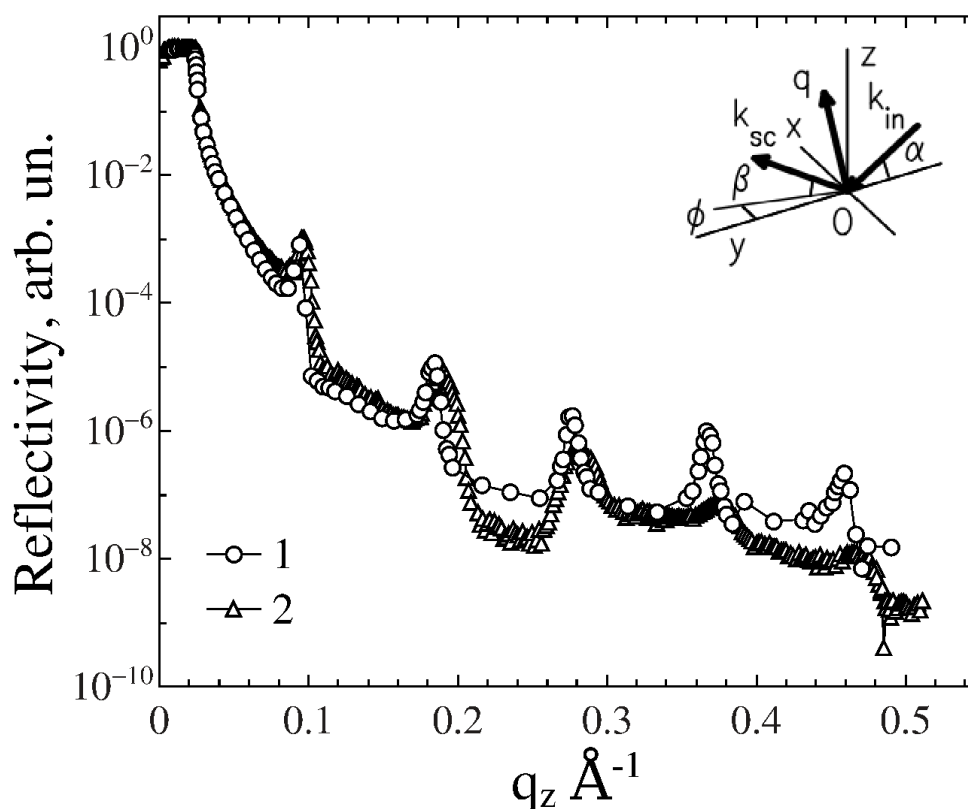


Рисунок 1 – Угловые зависимости коэффициента отражения  $R(q_z)$  от липидного мультислоя, измеренные на лабораторном дифрактометре ДРШ, ФНИЦ КиФ РАН (1) и синхротронной станции ID31, ESRF (2). Врезка: схема отражения и рассеяния рентгеновского пучка от поверхности.

Применение лабораторных источников могло бы ускорить прогресс в области исследований жидкофазных плёнок и границ раздела. Тем более что, в настоящий момент использование синхротронных источников и проведение там экспериментов затруднительно. В частности, это касается и экспериментов по изучению границ раздела жидкость — жидкость. Примеры представлены, например, в работах [11-12], где изучалась динамика упорядочения длинноцепочечных спиртов на границах раздела углеводород-вода. В работе [13] применительно к исследованию структуры адсорбционной пленки октадеканамида на планарной межфазной границе толуол-вода была хорошо обозначена проблема использования лабораторных источников — их малая яркость. Основной причиной этого является недостаточный сигнал, обусловленный сильным поглощением в объёме среды, что приводит к значительной неоднозначности при восстановлении распределений диэлектрической проницаемости. Однако увеличение жесткости излучения приводит к уменьшению яркости, и единственным путем к решению данной проблемы является разработка и производство компактных источников с более высокой яркостью и энергией.

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части проведения рентгеновских рефлектометрических исследований.

#### Список литературы

1. Tolan M. X-Ray Scattering from Soft-Matter Thin Films. // Berlin: Springer-Verlag, 1999. — Vol. 148 of Springer Tracts in Modern Physics. — 197 p.
2. I.V. Kozhevnikov. Physical analysis of the inverse problem of X-ray reflectometry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2003. – Vol. 508. – P. 519–541.
3. Luke A. Clifton, Richard A. Campbell, Federica Sebastiani, José Campos-Terán, Juan F. Gonzalez-Martinez, Sebastian Björklund, Javier Sotres, Marité Cárdenas. Design and use of model membranes to study biomolecular interactions using complementary surface-sensitive techniques // Advances in Colloid and Interface Science – 2020 – V. 277 – P. 102118.
4. Тихонов А.М. Мультислой фосфолипидных мембран на гидрозольной подложке. // Письма в ЖЭТФ — 2010 – Т. 92 – С. 394.
5. Тихонов А.М., Асадчиков В.Е., Волков Ю.О., Роцин Б.С., Монахов И.С., Смирнов И.С. Кинетика формирования фосфолипидного мультислоя на поверхности кремнезоля // Письма в ЖЭТФ – 2016 – Т. 104, вып. 12 – С. 880-887.
6. Тихонов А.М. Незеркальное рентгеновское рассеяние на планарном фосфолипидном мультислое // ЖЭТФ – 2020 – Т. 158, вып. 5 (11) – С. 821-831.
7. Тихонов А.М., Асадчиков В. Е., Волков Ю.О., Нуждин А.Д., Роцин Б.С. Термостатная камера для рентгеновских исследований тонкопленочных структур на жидких подложках // Приборы и техника эксперимента – 2021 – № 1 – С. 146-150.
8. Волков Ю.О., Асадчиков В.Е., Роцин Б.С., Нуждин А.Д., Тихонов А.М. Динамика структуры ламеллярных мультислоёв фосфолипидов на жидкости по данным синхротронной рентгеновской рефлектометрии // Успехи в химии и химической технологии – 2022 – Т. XXXVI. № 7 – С. 28-30.
9. Krivonosov Yu.S., Mamich V.F., Moseiko L.A., Moseiko N.I., Mchedlishvili B.V., Savel'ev S.V., Senin R.A., Smykov L.P., Tudosi G.A., Fateev V.D., Chernenko S.P., Cheremukhina G.A., Cheremukhin E.A., Chulichkov A.I., Shilin Yu.N., Shishkov V.A. An X-ray Diffractometer with a Mobile Emitter–Detector System // Instruments and Experimental Techniques – 2005 – V. 48 (3) – P. 364-372.
10. Асадчиков В.Е., Волков Ю.О., Нуждин А.Д., Роцин Б.С., Тихонов А.М. Перспективы рентгеновской рефлектометрии с использованием лабораторных источников для анализа структуры тонких плёнок на поверхности многокомпонентных жидкостей // РЭНСИТ – 2020 – Т. 12, № 1 – С. 145-152.
11. Aleksey M. Tikhonov and Mark L. Schlossman. Vaporization and layering of alkanols at the oil/water interface // J. Phys.: Condens. Matter – 2007 – V. 19 – P. 375101.
12. Тихонов А. М. Термотропный фазовый переход в адсорбционной пленке триаконолановой кислоты на границе н-гексан – вода // Письма в ЖЭТФ – 2017 – Т. 105, вып. 12 – С. 737-743.
13. Тихонов А.М., Волков Ю.О. Рентгеновская рефлектометрия адсорбционной пленки октадеканамида на границе толуол–вода// ЖЭТФ – 2019 – Т. 156, вып. 3 (9) – С. 440-448.



УДК 621.383.292

Огородников Д. А.<sup>1</sup>, Богатырев Ю. В.<sup>1</sup>, Ластовский С. Б.<sup>1</sup>,  
Лемешевская А. М.<sup>2</sup>, Цымбал В. С.<sup>2</sup>

## ВЛИЯНИЕ ГАММА-КВАНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ SiФЭУ С ОПТИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫМИ ЯЧЕЙКАМИ P<sup>+</sup>-N-N<sup>+</sup>-ТИПА

<sup>1</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь

Исследовано влияние облучения гамма-квантами Co<sup>60</sup> на темновой ток  $I_b$  кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ) с ячейками p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>-типа, которые оптически изолированы друг от друга металлизированными канавками. Вывод металла канавки соединялся с n<sup>+</sup>-областью. При облучении в режиме лавинного пробоя наблюдается немонотонное изменение темнового тока. При дозах  $D = (0,3 \div 1) \cdot 10^5$  рад значение  $I_b$  увеличивается на три-четыре порядка, а при  $D = (1 \div 2) \cdot 10^5$  рад уменьшается до значений, не превышающих исходное в 2,5 раза, и практически не изменяется вплоть до  $D = 1 \cdot 10^6$  рад.

**Введение.** Кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiФЭУ) представляет собой матрицу параллельно включенных ячеек, каждая из которых содержит лавинный фотодиод с последовательно включенным гасящим резистором. SiФЭУ предназначены для регистрации предельно слабого оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, ионизирующих излучений и единичных фотонов [1]. Недостатком SiФЭУ является оптическая связь между ячейками. Фотоны, порождённые при рекомбинации «горячих» электронов и дырок при гейгеровском разряде в одной из ячеек, проникают в соседние и генерируют там электронно-дырочные пары. Фотоэлектроны и дырки запускают дополнительные гейгеровские разряды и на выходе прибора регистрируются ложные импульсы.

Одним из способов подавления оптической связи является создание разделительных канавок между ячейками [2-4]. Канавки после пассивации стенок слоем SiO<sub>2</sub> могут заполняться металлом. В работах [3, 4] исследовалось влияние альфа-частиц и рентгеновских квантов на темновой ток образцов SiФЭУ с оптической изоляцией ячеек канавками, которые после пассивации стенок слоем SiO<sub>2</sub> заполнялись вольфрамом. Ячейки представляли собой n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-структуры. Авторами [3, 4] рассматривались два варианта образцов SiФЭУ. В первом варианте вывод металла канавки электрически соединялся с n<sup>+</sup>-областью ячейки, в другом – с p<sup>+</sup>-областью. Радиационным эффектом в SiФЭУ, влияющим на функциональные параметры, является увеличение темнового тока, что и наблюдалось в работах [3, 4]. В наибольшей степени этот нежелательный эффект проявлялся при облучении в активном электрическом режиме образцов, вывод металла канавки которых был соединен с n<sup>+</sup>-областью. Значение темнового тока таких SiФЭУ увеличивалось в результате облучения на 4 порядка, в то время как у образцов другой конструкции — менее чем в два раза. Полученный результат объясняется усилением выхода дырочного заряда под действием электрических полей в слоях оксидов разделительных канавок ячеек SiФЭУ, облучаемых под обратным смещением [4]. Накопленный положительный заряд усиливает напряженность электрического поля в фотоактивной p-области ячеек вблизи окисла разделительных канавок, что стимулирует генерацию неравновесных электронно-дырочных пар и ведет к увеличению темнового тока.

Распределение векторов напряженности электрического поля зависит от структуры ячеек SiФЭУ. В работах [3, 4] исследовались образцы SiФЭУ с ячейками в виде n<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-структур. В этих ячейках областью лавинного умножения фотоэлектронов является p-область. Представляет интерес изучение влияния проникающих излучений на образцы SiФЭУ с оптически изолированными ячейками p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>-типа.

Цель работы – исследование влияния гамма-квантов Co-60 на темновой ток образцов SiФЭУ с ячейками p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>-типа, оптически изолированными металлизированными разделительными канавками.

**Методика эксперимента.** Объектом испытаний являлись опытные образцы малогабаритного SiФЭУ, изготовленные в Филиале НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Размеры кристаллов SiФЭУ составляли  $S_{кр}=1,44 \times 1,44 \text{ мм}^2$ , со светочувствительной площадью  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  и размером одного пикселя  $35 \times 35 \text{ мкм}^2$  (всего 1004 пикселя). Пиксели представляют собой  $p^+-n-p^+$ -диодные структуры, изготовленные в эпитаксиальной плёнке с удельным сопротивлением  $0,4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  толщиной  $4 \text{ мкм}$   $n$ -типа (4КЭФ0,4), выращенной на низкоомной подложке  $n$ -типа КЭМ0.01. Последовательно в цепи с каждым диодом выполнен высокоомный гасящий резистор. Фотоактивная поверхность диода и канавок покрыты слоями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Напряжение лавинного пробоя исследуемых SiФЭУ составляло порядка  $U_{br} = 25 \pm 1,0 \text{ В}$ .

Конструктивной особенностью исследуемых образцов SiФЭУ является наличие оптической экранировки ячеек друг от друга с помощью разделительных металлизированных канавок в виде решётки для устранения вышеописанного паразитного оптического взаимодействия. Исследовались SiФЭУ, которые [3, 4] считаются наименее стойкими к воздействию ионизирующих излучений: в данной конструкции прибора выводы металла (вольфрам) канавок соединялись с контактными площадками  $n^+$ -областей.

Образцы SiФЭУ облучались гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  на установке «Исследователь» в активном (при значениях напряжения, которое превышает напряжения пробоя на  $3 \text{ В}$ ) и пассивном (выводы образцов были короткозамкнуты) электрических режимах.

**Экспериментальные результаты и обсуждение.** На рисунке 1 представлены обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) SiФЭУ до и после облучения разными дозами  $D$  гамма-квантов  $\text{Co}^{60}$  в пассивном электрическом режиме. Существенных изменений ВАХ в результате облучения образца не наблюдается. Это также хорошо видно из дозовых зависимостей обратного тока  $I_b$  при разных значениях обратного смещения. При  $D = 1 \cdot 10^6 \text{ рад}$  значение  $I_b$  при обратном смещении  $25 \text{ В}$  увеличилось в 3 раза.

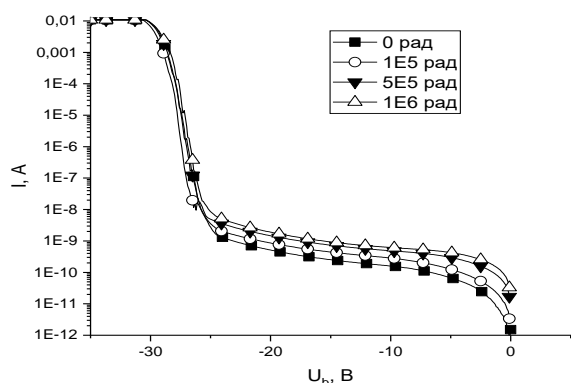


Рисунок 1 – Обратная ВАХ до и после облучения в режиме хранения

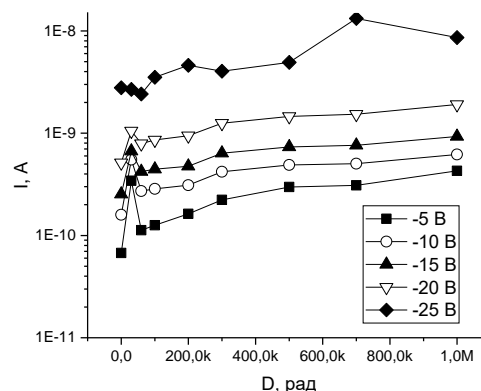


Рисунок 2 – Изменение обратного тока при разных значениях обратного смещения с ростом дозы облучения в режиме хранения

На рисунке 3 представлены обратные ВАХ образца SiФЭУ до и после облучения разными дозами гамма-квантов  $\text{Co}^{60}$  в активном электрическом режиме. При облучении на образец подавалось обратное смещение  $U_b = -29,6 \text{ В}$ , что соответствовало перенапряжению  $|U_b - U_{br}| = 3 \text{ В}$ . Из полученных результатов видно, что на начальном этапе облучения ( $D = (3 \div 5) \cdot 10^4 \text{ рад}$ ) значение  $I_b$  возрастает на три-четыре порядка, а при  $D = (1 \div 2) \cdot 10^5 \text{ рад}$  уменьшается до значений, не превышающих исходное в  $3 \div 4$  раза (рисунок 4). При  $D = 1 \cdot 10^6 \text{ рад}$  значение  $I_b$  при обратном смещении  $25 \text{ В}$  больше исходного в  $2,4$  раза.

Максимальная напряженность  $E$  электрического поля и, следовательно, величина накопленного заряда  $Q$  в оксиде разделительных канавок SiФЭУ, облучаемых в режиме лавинного пробоя, достигаются в слое, граничащем с  $p^+$ -областью. В процессе облучения в объёме диэлектрика вблизи границы  $\text{SiO}_2/p^+-\text{Si}$  накапливается положительный заряд, а в объёме полупроводника возрастают напряженность электрического поля и темп генерации неравновесных электронно-дырочных пар, то есть значение темнового тока (начальный этап облучения). Наряду с накоплением заряда  $Q$  идет процесс его нейтрализации. Электроны термически забрасываются из валентной зоны на уровни ловушек, а также туннелируют из

полупроводника. С ростом  $D$  напряженность электрического поля усиливается в области локализации  $Q$  и ослабевает в остальной толще диэлектрика. При определенном значении  $D$  выравниваются скорости накопления и нейтрализации  $Q$ , в результате чего достигается насыщение величины  $I_b$  [5].

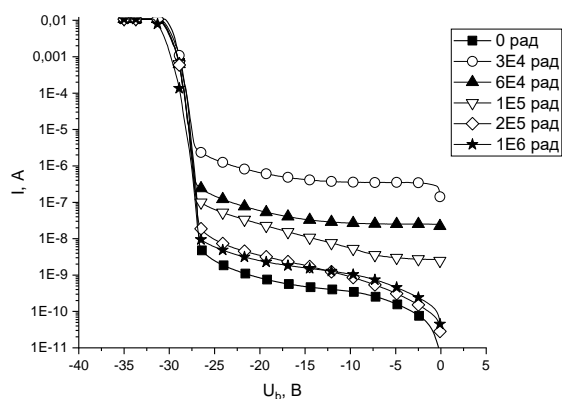


Рисунок 3 – Обратная ВАХ до и после облучения в режиме лавинного пробоя

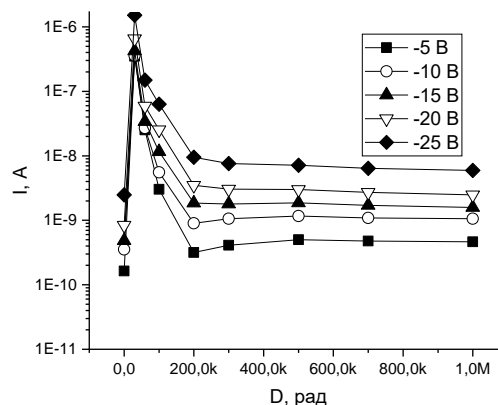


Рисунок 4 – Изменение обратного тока при разных значениях обратного смещения с ростом дозы облучения в режиме лавинного пробоя

Уменьшение значения темнового тока при  $D = (1 \div 2) \cdot 10^5$  рад, видимо, результат снижения темпа генерации  $Q$ , то есть уменьшения выхода дырочного заряда до уровня, сопоставимого с пассивным режимом облучения. Уменьшение  $E$  в слое  $\text{SiO}_2$  возможно, если допустить накопление при облучении не только положительного, но и отрицательного заряда вблизи границ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с металлом или  $\text{SiO}_2$ . Наличие такого заряда также приведёт к перераспределению падения напряжения в слое диэлектрика, несмотря на нейтрализацию положительного заряда [5].

**Заключение.** Исследовано изменение темнового тока образцов SiФЭУ, облучаемых гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  в различных электрических режимах. Ячейки SiФЭУ в виде  $p^+n-n^+$ -структур были оптически изолированы металлизированными разделительными канавками. Вывод металла канавок соединялся с  $n^+$ -областью ячеек. При облучении образцов в режиме хранения дозой  $D = 1 \cdot 10^6$  рад темновой ток  $I_b$  при обратном смещении 25 В возрастает в 3 раза. При облучении в режиме лавинного пробоя наблюдается немонокотное изменение  $I_b$ . На начальном участке облучения  $D = (0,3 \div 1) \cdot 10^5$  рад значение  $I_b$  увеличивается на три-четыре порядка, а при  $D = (1 \div 2) \cdot 10^5$  рад уменьшается до значений, не превышающих исходное в 2,5 раза, и практически не изменяется вплоть до  $D = 1 \cdot 10^6$  рад.

#### Список литературы

1. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 48 с.
2. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes / E. Popova [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2009. – Vol. 610, № 1. – P. 131–134.
3. Огородников, Д. А. Влияние облучения альфа-частицами на обратные вольтамперные характеристики кремниевых фотоумножителей / Огородников Д. А., Богатырев Ю. В., Ластовский С. Б., Кетько А. В., Лемешевская А. М., Цымбал В. С., Шпаковский С. В. Рубанов П. В., Луконин С. Е. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2021. № 3, С. 28-32.
4. Огородников Д. А. Моделирование накопления заряда в кремниевых фотоэлектронных умножителях под воздействием мягкого рентгеновского излучения // Д. А. Огородников // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 337–343.
5. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов // М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.

## МОДЕЛЬ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Предложена квазиклассическая модель расчета донорно-акцепторной (ДА) фотолюминесценции кристаллических полупроводников с водородоподобными примесями при низких (гелиевых) температурах и низких уровнях фотовозбуждения. Считается, что легирующие и компенсирующие атомы примесей образуют в кристаллической матрице нестехиометрическую простую кубическую «примесную решетку». Распределение уровней энергии и основных, и возбужденных состояний примесей предполагается гауссовым. Результаты расчета по предложенной формуле зависимости положения максимума линии ДА фотолюминесценции от концентрации и степени компенсации основных примесей согласуются с известными экспериментальными данными для кристаллов германия *p*- и *n*-типа.

Существующие модели излучательной рекомбинации донорно-акцепторных (ДА) пар все еще не позволяют рассчитывать зависимости положения максимума линии излучения от концентрации водородоподобных примесей, которые количественно согласовывались бы с имеющимися экспериментальными данными (см., например, [1–5]).

Цель работы — предложить формулу для расчета зависимости положения максимума полосы ДА фотолюминесценции кристаллического германия от концентрации основной (легирующей) примеси и степени ее компенсации неосновной (компенсирующей) примесью с учетом электростатических флуктуаций потенциальной энергии ионов примесей, а также неравновесных электронов на дне *c*-зоны и дырок на потолке *v*-зоны при низких температурах и низких уровнях фотовозбуждения кристалла.

Рассмотрим слабо легированный и умеренно компенсированный кристаллический полупроводник *p*-типа. Пусть объемная концентрация водородоподобных акцепторов  $|a\rangle$  в зарядовых состояниях (0) и (−1) [обозначим их  $|a, 0\rangle$  и  $|a, -1\rangle$ ] равна  $N_a = N_0 + N_{-1}$ , а концентрация доноров  $|d\rangle$  в зарядовых состояниях (+1) [обозначим их  $|d, +1\rangle$ ] равна  $N_d = N_{+1} < N_a$ . (Зарядовые состояния примесей выражены в единицах элементарного заряда *e*.) Степень компенсации акцепторов донорами есть  $0 < K = N_d/N_a < 1$ .

При низких температурах и низких уровнях фотовозбуждения кристалла концентрация дырок *v*-зоны  $p \ll K(1 - K)N_a$ , где  $K(1 - K)$  — доля пар акцепторов, лимитирующих по [6] высокотемпературную прыжковую миграцию между ними дырок. Условие электрической нейтральности кристалла имеет вид [7]:  $N_{-1} \approx KN_a = N_d$ .

Следуя [8], примем, что легирующая (акцепторы) и компенсирующая (доноры) примеси образуют в кристаллической матрице полупроводника нестехиометрическую простую кубическую решетку с периодом трансляции  $d_{im} \approx 1.24[(1 + K)N_a]^{-1/3}$ , где  $(1 + K)N_a = N_d + N_a$  — концентрация всех примесей. Величина  $d_{im}$  равна среднему диаметру сферической области в кристалле, приходящейся на один атом или ион примеси (как на донор, так и на акцептор). Примем, что плотность распределения уровней энергии и основных, и возбужденных состояний акцепторов в запрещенной зоне имеет нормальное (гауссово) распределение [9]. Тогда среднеквадратичная флуктуация уровней энергии акцепторов (эффективная ширина акцепторной зоны)  $W_a$  при учете только кулоновского взаимодействия акцептора  $|a, -1\rangle$  с ионами 1-й координационной сферы примесной решетки с периодом  $d_{im}$  равна [8]:

$$W_a = (e^2/4\pi\epsilon d_{im})[12K/(1 + K)]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\epsilon = \epsilon_r\epsilon_0$  — статическая диэлектрическая проницаемость кристаллической матрицы.

Из условия электрической нейтральности при  $W_a \gg k_B T$  без учета возбужденных состояний акцепторов уровень Ферми  $E_F^{(v)} < 0$  определяется уравнением (см., например, [7, 8]):

$$2K = 1 - \operatorname{erf}[(E_F^{(v)} + I_a + k_B T \ln \beta_a)/\sqrt{2} W_a], \quad (2)$$

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

где  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $I_a$  — энергия термической ионизации одиночного акцептора из основного (невозбужденного) состояния;  $\beta_a$  — фактор вырождения уровня энергии водородоподобного акцептора; величины  $E_F^{(v)}$  и  $I_a$  отсчитываются от потолка  $v$ -зоны нелегированного кристалла.

Акт DA фотолюминесценции включает три стадии:

1) Неравновесный электрон, «поднятый» фотоном из  $v$ -зоны в  $c$ -зону, термализуясь, опускается на дно  $c$ -зоны (кинетическая энергия  $E_{kin}^{(n)} = 0$ ), а неравновесная дырка, термализуясь, поднимается на потолок  $v$ -зоны (кинетическая энергия  $E_{kin}^{(p)} = 0$ ). Тогда полные энергии электрона  $E_n$  и дырки  $E_p$  равны их потенциальным энергиям  $U_n$  и  $U_p$ . Среднеквадратичные флуктуации потенциальной энергии электрона, перешедшего со дна  $c$ -зоны на возбужденное состояние ( $s = 2, 3, \dots$ ) электрически нейтрального донора  $|d, 0; s\rangle$ , и дырки, перешедшей с потолка  $v$ -зоны на возбужденное состояние ( $q = 2, 3, \dots$ ) электрически нейтрального акцептора  $|a, 0; q\rangle$ , равны  $W_n$  и  $W_p$  соответственно. Донор  $|d, +1\rangle$  обладает энергией  $E_{d,+1}$ , а акцептор  $|a, -1\rangle$  — энергией  $E_{a,-1}$ . Полагаем, что ионы доноров  $|d, +1\rangle$  и акцепторов  $|a, -1\rangle$  не имеют возбужденных состояний. Кулоновская энергия взаимодействия донора  $|d, +1\rangle$  и акцептора  $|a, -1\rangle$  на расстоянии  $d_{im}$  равна  $U_{-1,+1} = -e^2/4\pi\epsilon d_{im}$ . Среднеквадратичные флуктуации потенциальной энергии донора  $|d, +1\rangle$  и акцептора  $|a, -1\rangle$  равны  $W_d$  и  $W_a$ . В начальном состоянии энергия электрона на дне  $c$ -зоны, дырки на потолке  $v$ -зоны и DA пары ионов есть

$$E_{in} = U_n + U_p + \sqrt{W_d^2 + W_n^2} + E_{d,+1} + E_{a,-1} + U_{-1,+1} + \sqrt{W_a^2 + W_p^2}. \quad (3)$$

2) Электрон  $c$ -зоны захватывается донором в состоянии  $|d, +1\rangle$ , и образуется возбужденное состояние донора  $|d, 0; s\rangle$  с энергией, равной  $E_{d,0;s} = E_d/s^2$ , где  $E_d$  — уровень энергии основного состояния нейтрального донора. Аналогично, дырка  $v$ -зоны захватывается акцептором в состоянии  $|a, -1\rangle$ , и образуется акцептор  $|a, 0; q\rangle$  с энергией  $E_{a,0;q} = E_a/q^2$ , где  $E_a$  — уровень энергии основного состояния нейтрального акцептора. Индексы  $s$  и  $q$  обозначают номера «орбит» электрона в возбужденном состоянии донора  $|d, 0\rangle$  и дырки в возбужденном состоянии акцептора  $|a, 0\rangle$ ;  $s = q = 1$  для основного состояния примесей. Энергия DA пары в конечном состоянии есть

$$E_{fin} = E_{d,0;s} + E_{a,0;q}, \quad (4)$$

где учтено, что и электрон со дна  $c$ -зоны, и дырка с потолка  $v$ -зоны захватываются на возбужденное состояние нейтрального донора и нейтрального акцептора (см., например, [10]).

3) Неравновесные электрон на доноре и дырка на акцепторе излучательно рекомбинируют (если они находятся на расстоянии  $d_{im}$ ), испуская фотон с энергией  $\hbar\omega_{em}$ . Считаем, что среднеквадратичные флуктуации потенциальной энергии электрона, перешедшего со дна  $c$ -зоны на донор (состояние  $|d, 0; s\rangle$ ), дырки, перешедшей с потолка  $v$ -зоны на акцептор (состояние  $|a, 0; q\rangle$ ), иона донора и иона акцептора равны, т. е.  $W_n = W_p = W_d = W_a$ . Тогда энергия фотона, испускаемого в одном акте DA рекомбинации, с учетом (1)–(4) равна

$$\hbar\omega_{em} = I_g - E_{d;s} - E_{a;q} - U_{-1,+1} - 2^{3/2} W_a, \quad (5)$$

где  $I_g > 0$  — ширина запрещенной энергетической зоны нелегированного полупроводника;  $E_{d;s} = E_{d,+1} - E_{d,0;s} > 0$  — энергия термической ионизации находящегося в возбужденном состоянии  $|d, 0; s\rangle$  электронейтрального донора (отрыва электрона от донора  $|d, 0; s\rangle$  и перехода его на дно  $c$ -зоны с нулевой кинетической энергией),  $E_{a;q} = E_{a,-1} - E_{a,0;q} > 0$  — энергия термической ионизации находящегося в возбужденном состоянии  $|a, 0; q\rangle$  электронейтрального акцептора (отрыва дырки от акцептора  $|a, 0; q\rangle$  и перехода ее на потолок  $v$ -зоны с нулевой кинетической энергией). Считаем, что DA рекомбинация происходит между электроном донора в возбужденном состоянии  $|d, 0; s\rangle$  и дыркой акцептора в возбужденном состоянии  $|a, 0; q\rangle$  при  $E_{d;s} = I_{d;s} = I_d/s^2$  и  $E_{a;q} = -E_F^{(v)}$ . Отметим, что энергия термической ионизации донора из первого возбужденного состояния ( $s = 2$ ) равна  $I_{d;2} = I_d/4$ , где  $I_d$  — энергия термической ионизации донора из основного состояния ( $s = 1$ ).

Рассчитанные по формуле (5) зависимости положения максимума  $\hbar\omega_{em}$  линии DA фотолюминесценции от концентрации основной примеси  $N_a$  (или  $N_d$ ) и степени ее компенсации  $K$  в целом количественно согласуются с экспериментальными данными [1, 11, 12] для кристаллов германия  $p$ - и  $n$ -типа. Умеренные расхождения расчетной кривой с экспериментальными данными при увеличении  $N_{a(d)}$  (или уменьшении  $K$ ) можно объяснить приближением к переходу полупроводника из «изоляторного» состояния в «металлическое». Это приводит к перекрытию акцепторной зоны с потолком  $v$ -зоны (или донорной зоны с дном  $c$ -зоны) и переходу от межпримесной к межзонной (краевой) рекомбинации электронов и дырок.

Итак, в работе предложена модель DA фотолюминесценции, учитывающей зоны разрешенных значений энергии для электронов и дырок, а также зоны водородоподобных примесей в энергетической щели кристаллических полупроводников. Считалось, что легирующие и компенсирующие атомы примесей в кристаллической матрице формируют нестехиометрическую простую кубическую «примесную решетку». Предполагалась нормальная (гауссова) плотность распределения уровней энергии акцепторов (и доноров) в запрещенной зоне. Получена формула, описывающая зависимость положения максимума полосы DA фотолюминесценции от концентрации примесей в полупроводниках при низких температурах и низких уровнях фотовозбуждения полупроводника. Расчеты по предложенной модели в целом количественно согласуются с известными экспериментальными данными по положению максимума линии DA рекомбинации в кристаллах германия  $p$ - и  $n$ -типа.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии».

#### Список литературы

1. Доброго, В.П. Межпримесная излучательная рекомбинация в компенсированном германии / В.П. Доброго, И.С. Шлимак // ФТП. – 1967. – Т. 1, № 10. – С. 1478–1485.
2. Williams, F. Donor–acceptor pairs in semiconductors / F. Williams // Phys. Status Solidi. – 1968. – Vol. 25, № 2. – P. 493–512.
3. Стыс, Л.Е. Особенности донорно-акцепторной рекомбинации в слабо легированных компенсированных полупроводниках / Л.Е. Стыс, М.Г. Фойгель // ФТП. – 1985. – Т. 19, № 2. – С. 217–223.
4. Стыс, Л.Е. Кинетика донорно-акцепторной рекомбинации в слабо легированных компенсированных полупроводниках / Л.Е. Стыс, М.Г. Фойгель // ФТП. – 1985. – Т. 19, № 2. – С. 224–229.
5. Леванюк, А.П. Краевая люминесценция прямозонных полупроводников / А.П. Леванюк, В.В. Осипов // УФН. – 1981. – Т. 133, № 3. – С. 427–477.
6. Максимальная прыжковая электропроводность на постоянном токе по водородоподобным примесям в полупроводниках / Н.А. Поклонский [и др.] // ФТП. – 2022. – Т. 56, № 11. – С. 1046–1054.
7. Drift-diffusion model of hole migration in diamond crystals via states of valence and acceptor bands / N.A. Poklonski [et al.] // J. Phys. Commun. – 2018. – Vol. 2, № 1. – P. 015013 (1–14).
8. Poklonski, N.A. Quasiclassical description of the nearest-neighbor hopping dc conduction via hydrogen-like donors in intermediately compensated GaAs crystals / N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, A.G. Zabrodskii // Semicond. Sci. Technol. – 2010. – Vol. 25, № 8. – P. 085006 (1–6).
9. Грибковский, В.П. Генерация излучения на переходах с участием гауссовых примесных зон / В.П. Грибковский, В.К. Кононенко // ЖПС. – 1970. – Т. 12, № 1. – С. 45–56.
10. Shah, J. Donor-acceptor pair recombination involving the first excited state of a donor in GaAs / J. Shah, R.C.C. Leite, J.P. Gordon // Phys. Rev. – 1968. – Vol. 176, № 3. – P. 938–942.
11. Dobrego, V.P. The influence of local potential fluctuations on the low-temperature radiative recombination of compensated germanium / V.P. Dobrego, I.S. Shlimak // Phys. Status Solidi. – 1969. – Vol. 33, № 2. – P. 805–809.
12. Rentzsch, R. Photoluminescence of heavily doped and compensated germanium / R. Rentzsch, I.S. Shlimak // Phys. Status Solidi A. – 1977. – Vol. 43, № 1. – P. 231–238.

## ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ SiC НА СТРУКТУРАХ ПОЛИ-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si

Белорусский Государственный Университет, Минск, Республика Беларусь

Методом резерфордовского обратного рассеяния установлено, что вакуумная карбидизация структур поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si приводит к формированию слоёв SiC толщиной 20–45 нм. Методом инфракрасной-спектрометрии обнаружена полоса пропускания при 799 см<sup>-1</sup>, что соответствует валентным колебаниям связи Si-C. Установлено, что слоевое сопротивление SiC после 10 – 20 мин карбидизации составляет 450 и 2200 Ом/□ соответственно.

В последнее время, в разработке инфракрасных приёмников произошёл качественный скачок, что привело к появлению нового класса неохлаждаемых микроболометрических матриц в фокальной плоскости (ФРА) [1]. В качестве термочувствительных элементов в технологии ФРА используются кремниевые диоды на изоляторе. Однако, параметры таких диодов не достигают ожидаемых из-за высоких токов утечек и генерационно-рекомбинационных эффектов в области пространственного заряда (ОПЗ). Для уменьшения влияния таких эффектов применяются различные физико-технические методы: водородная пассивация дефектов на границе раздела Me/поли-Si, формирование p-i-n перехода и другие методы для увеличения толщины ОПЗ [1,2]. Для увеличения ОПЗ можно использовать слой широкозонного полупроводника, например карбида кремния (SiC), сформированного между металлом и поли-Si. SiC может быть использован для создания МЭМС и приборов оптоэлектроники нового поколения благодаря набору уникальных свойств и возможности интеграции в кремниевую технологию [3,4]. В работах [5,6] показано, что выращивание SiC путём вакуумно-термической обработки кремния сопровождается формированием пор на границе раздела SiC/Si, которые могут быть использованы как важный элемент мембранных фотодетекторов. Таким образом, целью настоящей работы было исследование режимов формирования слоёв SiC на поли-Si с последующим изучением их электрофизических характеристик.

В качестве подложек для формирования слоёв SiC использовали структуру поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si. Толщина слоёв поли-Si, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и SiO<sub>2</sub> составляла 600, 170 и 160 нм соответственно. Легирование слоёв поли-Si проводилось с помощью имплантации ионов As с энергией 60 кэВ до дозы 6.25×10<sup>15</sup>ион/см<sup>2</sup>. Все образцы структур очищали в 5% растворе плавиковой кислоты с последующей промывкой в деминерализованной воде. Далее образцы помещали в нагревательную ячейку, закреплённую в камере вакуумного универсального поста ВУП-5. Типичное рабочее давление в камере при карбидизации кремния составляло P ~ 1×10<sup>-3</sup> Па. Контроль температуры образцов осуществлялся термопарой платиновой-платина типа ПП-1. Процесс формирования слоёв SiC методом вакуумной карбидизации заключался в нагреве до 1100 °С в течении нескольких минут и выдерживании образцов при данной температуре в течение 10-20 минут.

Химические профили атомов (состав) и толщину слоёв в сформированных структурах определяли из спектров резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов He<sup>2+</sup> с энергией 1.3МэВ. Исследования РОР проводили с использованием ядерно-физического комплекса на основе электростатического ускорителя ионов AN-2500 фирмы High Voltage. Обработка экспериментальных спектров РОР проводилась с использованием программы HEAD6. Спектры пропускания измерялись с помощью Фурье-спектрометра Perkin Elmer Spectrum 3 Optica при нормальном падении излучения на образец. Спектры записывались в диапазоне 400–7000 см<sup>-1</sup> (λ ~ 2,5 -25 мкм) с диафрагмой 3 мм, накоплением 1 мин и спектральным разрешением 4 см<sup>-1</sup>.

На рисунке 1а представлены ИК спектры пропускания структур SiC/поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si. В диапазоне 7000 до 4000 см<sup>-1</sup> специфических особенностей пропускания

структуры SiC/Si не наблюдалось. Формирование SiC на поли-Si подтверждает присутствие на спектрах поперечной оптической (ТО)  $799 \text{ см}^{-1}$  фоновой моды SiC [5]. Наблюдаемая на спектрах полоса поглощения  $\sim 610 \text{ см}^{-1}$  относится к двух фоновой моде Si-Si (ТО+ТА) поперечного оптического и акустического фононов с одинаковыми волновыми векторами, но принадлежащих разным линиям колебательного спектра. При этом, достаточно большая полуширина полосы  $27 \text{ см}^{-1}$  свидетельствует о поликристаллической структуре кремния. В спектрах пропускания обнаружена полоса  $1100 \text{ см}^{-1}$  соответствующие связям Si-O-Si соответственно.

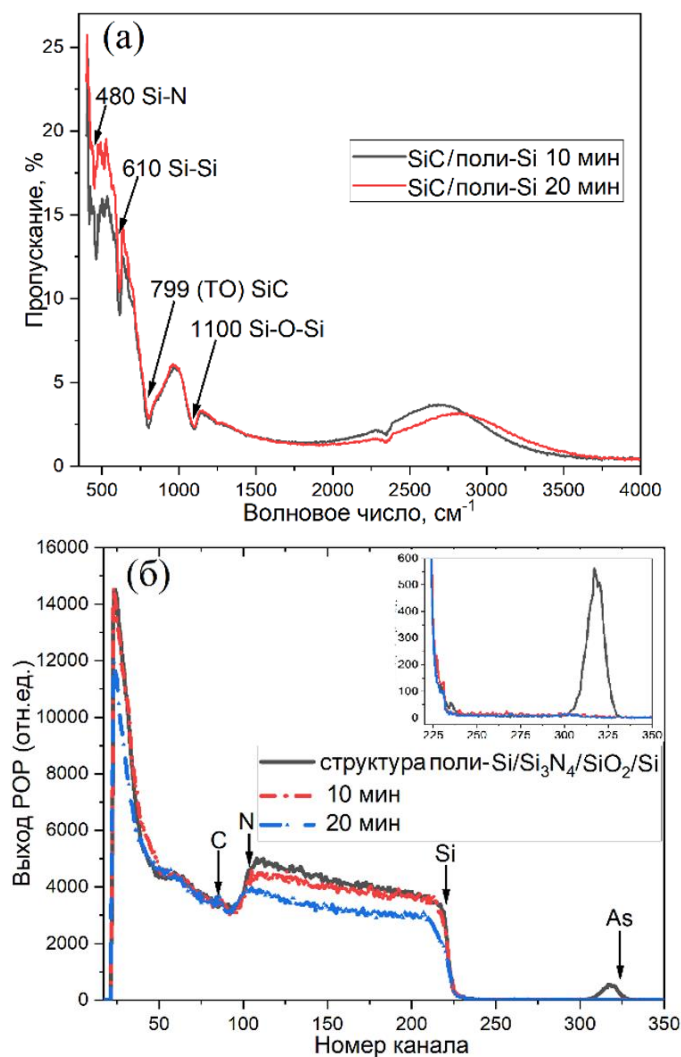


Рисунок 1 – а – Спектры пропускания структур SiC/поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si, б - спектры POP исходной структуры поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si до и после карбидизации при температуре 1100 °С, в течение 10-20 мин.

На рисунке 1 б представлены спектры POP исходной структуры поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si и SiC/поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si. На спектре исходной структуры в области каналов 309-325 виден пик, соответствующий примеси As. При карбидизации происходит разгонка примеси, поэтому на спектрах структур SiC/поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si пик As не наблюдается. Формирование слоёв SiC подтверждают наклон спектров в диапазоне каналов 210-230 и увеличение интенсивности выхода обратно-рассеянных ионов в области каналов 77-90, связанных с наличием атомов углерода в структуре.

Результаты измерения электрофизических характеристик SiC приведены в таблице 1. Из данных, приведенных в таблице видно, что увеличение длительности карбидизации приводит к изменениям электрофизических характеристик SiC: увеличивается слоиное сопротивление и подвижность носителей заряда и уменьшается объёмная концентрации носителей заряда.



Электрофизические характеристики SiC на поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si

Длительность карбидизации, мин	Слоевое сопротивление, Ом/□	Подвижность носителей заряда, см <sup>2</sup> /(В×с)	Объемная концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup>
10	450	8.3	1.7×10 <sup>21</sup>
20	5500	12	2.1×10 <sup>19</sup>

Значение слоевого сопротивления образца SiC сформированного после 20 мин карбидизации соответствует литературному значению слоевому сопротивлению структуры SiC/Si [7].

Таким образом, методами ИК-Фурье спектроскопии и РОР показано, что при вакуумной карбидизации структур поли-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si происходит образование слоёв карбида кремния. Увеличение длительности карбидизации приводит к увеличению толщины слоёв SiC и изменению электрофизических характеристик.

Исследования выполнены в рамках проекта 3.1.2 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (№ ГР 20212702) и проекта БРФФИ T22-030 (№ ГР 20221052).

#### Список литературы

1. Yuryev, V. A., Chizh. K. V. Pt silicide/poly-Si Schottky diodes as temperature sensors for bolometers/V. A. Yuryev [et al] // Journal of Applied Physics. – 2015. - V. 117 (20). - P. 4502.
2. Rogalski, A. Recent progress in infrared detector technologies // Infrared Physics & Technology. – 2011. – Vol. 54. – P.136-154.
3. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail. Critical Rev. / G. Ferro // Solid State and Materials Sciences. – 2015. V. 40. P. 56–76.
4. Chen J. Formation of SiC SOI Structures by Direct Growth on Insulating Layers / J. Chen, J. Scofield, A. J. Steckl // J. Electrochem. Soc. – 2000. – Vol.147. – P.3845 - 3849.
5. Лобанок, М. В. Формирование эпитаксиальных слоев 3C-SiC на Si методом быстрой вакуумно-термической обработки / М. В. Лобанок и [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – №2. – Стр. 79-86.
6. Кукушкин С. А. Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии/ С.А. Кукушкин, А.В. Осипов // Физика твердого тела. – 2008. - Том 50, - Вып. 7.
7. Кукушкин С. А. Подвижность носителей заряда в нелегированных слоях SiC, выращенных новым методом эпитаксии на Si / С. А. Кукушкин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2013. – Том 39. – Вып. 10. – Стр. 81 - 88.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-исследовательское учреждение “Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко” Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения эластичных пенополиуретанов в подземных волоконно-оптических системах охраны периметра. Показана эффективность разработанных схем и методик измерения для регистрации фактов нарушения охраняемой территории при условии минимизации вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала.

Для защиты подходов к объектам или запретным зонам перспективным является использование волоконно-оптических сигнальных датчиков в системах охраны периметра. Сенсорные свойства оптического волокна обусловлены тем, что структура световой волны в волокне очень восприимчива к внешним воздействиям, которые могут модулировать амплитуду, фазу, модовый состав (спекл-структуру) или поляризацию волны [1]. К преимуществам волоконно-оптических систем можно отнести их нечувствительность к воздействию электромагнитных и радиочастотных помех, возможность работы при сложном рельефе местности, отсутствие электромагнитного излучения и активного электронного оборудования на охраняемом периметре, что затрудняет обнаружение с помощью поисковой техники.

Эксперименты по использованию традиционных методов регистрации нарушителей, применяемых в наземных волоконных системах охраны периметра, когда волокно размещается на упругих сетчатых заборах, при подземных испытаниях показали высокую сейсмочувствительность к посторонним паразитным воздействиям. Это приводило к резкому возрастанию вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала. Установлено, что наиболее достоверный способ фиксирования факта нарушения является непосредственное контактное воздействие при нахождении нарушителя на охраняемой территории. Для решения данной задачи необходимо использовать специальную конструкцию чувствительного элемента. Как правило, для обеспечения высокой и однородной чувствительности, оптическое волокно укладывается на резиновые маты и сверху накрывается металлической сеткой [2]. Однако такая конструкция обладает рядом недостатков: с течением времени под воздействием окружающей среды резина теряет свои упругие свойства, вода вперемешку с пылью скапливается вокруг волоконного световода (ВС). Все это ведет к ухудшению чувствительности датчика. Кроме того, металлические детали легко обнаружить с помощью поисковой техники и демаскировать охранную систему.

Для устранения указанных недостатков была разработана новая конструкция чувствительного элемента (рисунок 1). В качестве упругой основы использовались полосы эластичного пенополиуретана (ППУ), геометрия которых повторяло контур расположения волоконного световода, сверху укладывалась каркасная двуслойная жесткая экструдированная георешетка из полипропилена с крупной ячеистой структурой 20×20 см, далее – стеклотканевая сетка с ячейками 2×2 мм и маскирующее покрытие. Основанием для всей конструкции служил перфорированный стеклопластик, который совместно с гравийной подложкой обеспечивал дренажную функцию. Шаг укладки оптического волокна и ППУ составлял 20 см, ВС располагается «змейкой», а георешетка устанавливалась посередине между витками ВС. Такая конструкция обеспечивала отсутствие «мертвых зон», нечувствительных к внешнему воздействию. По сравнению с обычно используемыми в качестве упругих элементов резиновыми матами применение полос из эластичного пенополиуретана обеспечивает следующие преимущества: способность долгое время сохранять упругие свойства, не разрушаться под воздействием изменяющихся условий окружающей среды; негигроскопичность вслед-

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

ствие запекания наружного слоя и плотного прилегания к основанию; неподверженность разрушению под воздействием грызунов и бактерий; полосы имеют ширину, достаточную, чтобы на них уложить и закрепить оптоволокно, и не закрывают всю площадь охраняемой территории, что уменьшает общую стоимость устройства; остатки воды и мусора скапливаются на стеклопластиковом основании и не влияют на работоспособность системы.



Рисунок 1 – Конструкция чувствительного элемента волоконно-оптической системы охраны периметра

В лаборатории ФХПМ и ПОС НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ разработаны смесительно-заливочная установка и технология по автоматическому нанесению эластичных пенополиуретанов с различной твердостью по Шору по заданной траектории. Данная установка позволяла наносить полосы пенополиуретана на лист стеклопластика размером 2,5×2,0 м с шагом 20 см. Погрешность позиционирования смесительной головки не превышала 1 мм. Скорость заливки равна 15 см/с, таким образом, время заливки стандартного листа составляла 3 мин. Твердость упругого элемента варьировалась подбором типа полиэфира, соотношением между полиэфирами и изоционатами, маркой отвердителя.

Проведены экспериментальные исследования величины деформации  $\Delta h$  волоконного световода, расположенного на пенополиуретановом упругом элементе (ПУЭ) в зависимости от упругих свойств элемента, количества точек деформации и воздействующей нагрузки (таблица 1). Высота ПУЭ  $h=1$  см, ширина  $l=1,5$  см, расстояние между полосами 20 см, диаметр трубки каркасной георешетки 8 мм. Твердость различных образцов ПУЭ определялась в единицах по Шору (А). Результаты экспериментов для одной  $N=1$  и двух точек деформации  $N=2$  ВС представлены в таблице 1. Все измерения проводились цифровым микрометром Mitutoyo, обладавшим в диапазоне измерений 0–25 мм погрешностью 1 мкм.

Таблица 1.

Величина деформации ВС при различных нагрузках для разной твердости ПУЭ

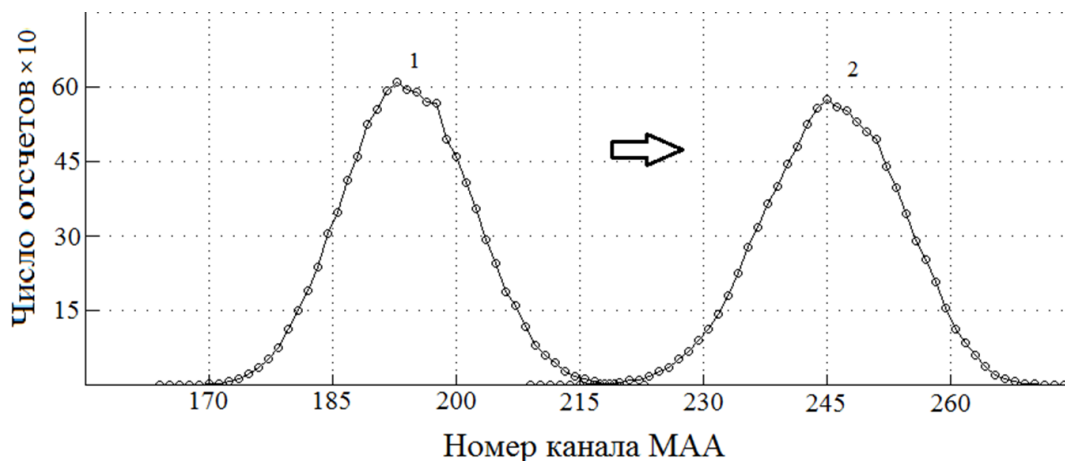
Нагрузка, кг	Твердость по Шору, $Sh_A=50$		Твердость по Шору, $Sh_A=60$		Твердость по Шору, $Sh_A=70$	
	$N=1$	$N=2$	$N=1$	$N=2$	$N=1$	$N=2$
	60	6,632 мм	4,705 мм	6,189 мм	4,393 мм	6,063 мм
72	7,148 мм	5,431 мм	6,672 мм	4,826 мм	6,368 мм	4,627 мм
85	7,496 мм	5,742 мм	6,914 мм	5,162 мм	6,476 мм	4,885 мм

На основе разработанного метода измерений с применением WDM-технологии спектрального разделения информационных каналов создана структура подземной волоконно-оптической системы охраны периметра рециркуляционного типа. Методика измерений основана на преобразовании изменений периода рециркуляции в изменение амплитуды электрического напряжения с помощью время-амплитудного преобразователя с последующей реги-

страцией смещения гистограмм распределения амплитуд по каналам многоканального амплитудного анализатора (МАО). При этом, используя технологию спектрального мультиплексирования, каждому охраняемому сектору соответствовали периоды рециркуляции оптических импульсов на разных длинах волн.

Разработана математическая модель изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами в зависимости от величины поперечных макродеформаций волоконного световода с прямоугольным профилем показателя преломления, которая учитывает возникновение дополнительных потерь в зависимости от радиуса изгиба, угла изгиба, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку и параметров самого кварцевого волокна, с помощью которой получены теоретические зависимости времени задержки оптических сигналов от твердости упругой основы, воздействующей массы, количества точек деформации, пиковой мощности излучения и длительности фронта циркулирующих импульсов. Так, например, для идущего нарушителя массой 60 кг величина временной задержки составляла 840 пс при мощности лазера 3 мВт и значении фронта импульса на входе порогового устройства 5 нс, твердости пенополиуретанового упругого элемента по Шору 50. Данное значение превышало разрешающую способность измерительной системы, равную 400 пс, а, следовательно, это позволяло достоверно фиксировать факт нарушения периметра.

Для проверки полученных результатов провели исследования смещения гистограммы распределения амплитуд по каналам МАО с использованием разработанного экспериментального стенда при следующих параметрах: пиковая мощность импульса 3 мВт, фронт импульса 5 нс, воздействующая масса 60 кг, число точек деформации волокна  $2 \times 2$  (имитировали распространение излучения по волокну в прямом и обратном направлении), твердость пенополиуретановой основы по Шору 50, цена одного канала МАО 20 пс (рисунок 2). Результирующее смещение гистограммы оказалось равной 1020 пс, что на 22 % больше, чем расчетные значения. Полученные данные с точки зрения регистрации нарушения являются положительным фактом, поскольку увеличивается чувствительность системы с теоретической 14 пс/кг до экспериментальной 17 пс/км.



1 – недеформированное волокно, 2 – волокно под воздействием деформации

Рисунок 2 – Экспериментальные исследования смещения гистограмм распределения амплитуды по каналам МАО для идущего нарушителя

Полученные теоретические и экспериментальные данные подтверждают эффективность применения разработанной методики регистрации фактов нарушения охраняемой территории как для идущего, так и для ползущего нарушителя.

#### Список литературы

1. Введенский, Б.С. Подземные датчики для охраны периметра / Б.С. Введенский // Алгоритм безопасности. – 2012. – № 1. – С. 6–13.
2. Оптоэлектронная распределенная сигнальная система / Кульчин Ю.И. [и др.] // Измерительная техника. – 2005. – № 7. – С. 28–32.

## ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ПЕРОВСКИТНОГО ОРТОАЛЮМИНАТА НЕОДИМА В ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ОТКРЫТОГО ОСТОВА

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Исследована электронная структура перовскитного ортоалюмината неодима  $\text{NdAlO}_3$  методами из первых принципов в рамках псевдопотенциального приближения открытого остова. Показано, что в материале присутствует запрещенная зона шириной 4,08 эВ, а зазоры между прямыми и непрямыми переходами составляет 10 и 17 мэВ, что позволяет классифицировать данный материал как непрямозонный при низких температурах, переходящий в квазипрямозонный при комнатной температуре.

Среди тройных оксидов состава  $\text{ABO}_3$  в науке и технике находят широкое применение ортотитанаты щелочноземельных металлов и ортоалюминаты элементов подгруппы скандия [1]. Первые представляют собой классические перовскиты со слабо искаженной кубической решеткой, обладающие высоким значением диэлектрической проницаемости, что делает их перспективными для применения в конденсаторных структурах [2]. Наличие сегнетоэлектрического упорядочения обуславливает их широкое применения в различных пьезоэлектрических устройствах [3]. Структура вторых является производной кристаллической структурой классических перовскитов, а потому их называют перовскитными, или материалами со структурой перовскита. Оба класса соединений используются в качестве матриц для легирования ионами лантаноидов для придания им люминесцентных свойств [4]. Также существуют материалы, сочетающие как сегнетоэлектрическое упорядочение, так и магнитное, например  $\text{YFeO}_3$ . Различные типы магнитного порядка в нем разделены небольшим энергетическим зазором (менее 100 мэВ), что делает его перспективным материалом для устройств стрейнтроники [5, 6]. В тоже время свойства перовскитного ортоалюмината неодима  $\text{NdAlO}_3$ , который можно рассматривать как предельный случай легирования  $\text{YAlO}_3$  неодимом, приводящий к формированию вследствие полного замещения иттрия, в литературе освещен недостаточно. В большей степени исследованы лишь люминесцентные свойства нанокристаллов  $\text{NdAlO}_3$ , пока электронная структура данного соединения остается не исследованной [7].

Исследование электронной структуры лантаноидов и их соединений представляет собой сложную задачу, обусловленную частично заполненным  $4f$ -подуровнем ионов лантаноидов, электроны которого даже в соединении демонстрируют атомно-подобный характер – закон дисперсии близок к линейному. Также необходимо учитывать спин-поляризованный характер  $4f$ -состояний и тот факт, что обычно они локализуются вблизи уровня Ферми из-за недооценки корреляционной энергии в локальных или полулокальных приближениях теории функционала плотности – основного метода получения информации об электронном строении вещества. Существуют различные способы решения этой проблемы, и одним из является псевдопотенциальное приближение открытого остова, при котором  $4f$ -электроны включаются в состав остова, при этом генерируется частичный корректирующий заряд остова таким образом, чтобы радиальная часть атомных орбиталей была близка к истинной. В таком приближении затруднительно исследовать магнетизм, т.к. частичный корректирующий заряд остова позволяет скорректировать собственные значения оператора энергии валентных электронов. Учитывая, что многие соединения лантаноидов парамагнитны, а ортоферриты антиферромагнетики, в данной работе мы рассматриваем электронную структуру только антиферромагнитно упорядоченного  $\text{NdAlO}_3$ .

Исследование структурных и электронных свойств проводили в пакете *OpenMX*, реализующего теорию функционала плотности в сочетании с теорией псевдопотенциала [8, 9]. Элементарную ячейку  $\text{NdAlO}_3$  строили исходя из экспериментальной  $\text{YAlO}_3$ , замещая ионы

иттрия ионами неодима. Самосоогласованный расчет останавливали, когда электронная энергия между двумя последовательными итерациями становилась менее  $10^{-7}$  эВ/ион. Интегрирование в первой зоне Бриллюэна проводили по  $\Gamma$ -центрированной регулярной сетке  $k$ -точек размером  $4 \times 3 \times 5$ . Сетку для численного интегрирования выбирали размером  $60 \times 80 \times 56$  точек. Псевдопотенциалы включали в качестве валентных:  $4f$ -,  $5s$ -,  $5p$ -,  $6s$ -электроны для неодима;  $3s$ -,  $3p$ -электроны для алюминия;  $2s$ - и  $2p$ - электроны для кислорода. Для неодима использовали два псевдопотенциала: стандартный, включающий  $4f$ -,  $5s$ -,  $5p$ - и  $6s$ -электроны; с открытым остовом –  $5s$ -,  $5p$ - и  $6s$ -электроны. Первый использовали для структурной релаксации элементарной ячейки с изменяемым объемом и позициями ионов, которую проводили до тех пор, пока силы, действующие на ионы и компоненты тензора напряжений, не становились менее  $0,01$  эВ/Å. Второй использовали для расчета зонной структуры и плотности электронных состояний. Численное моделирование проводили с учетом спиновой поляризации в обобщенном градиентном приближении. Базис псевдоатомных орбиталей строили с использованием двух оптимизированных базисных функций для каждого валентного электрона с одной дополнительной поляризационной оптимизированной базисной функцией для учета химической связи в кристалле.

Зонная структура представлена на рисунке 1а. Вдоль точек высокой симметрии мы наблюдаем большое число зон, распадающихся на две различающиеся по числу зон группы, разделенные энергетическим зазором шириной  $4,08$  эВ, что меньше на  $1,5$ – $2$  эВ, чем у  $YAlO_3$ . Отсчет энергии проводим от потолка валентной зоны. Максимум валентной зоны расположен не в центре зоны Бриллюэна, а в точке  $U$ . Помимо глобального экстремума существует еще два, лежащие на  $10$  и  $17$  мэВ ниже. Первый расположен примерно посередине отрезка  $Y$ – $Z$ , а второй расположен в точке  $\Gamma$  (центре зоны Бриллюэна). Учитывая, все зазоры между экстремумами трех зон расположены меньше  $kT$ , а кривизна кривых различна, следует ожидать существования носителей заряда с несколькими значениями эффективной массы. Дно зоны проводимости находится в точке  $Z$ , и, учитывая строение валентной зоны данный материал можно считать квазипрямозонным диэлектриком, переходящим в непрямозонный только при низких температурах.

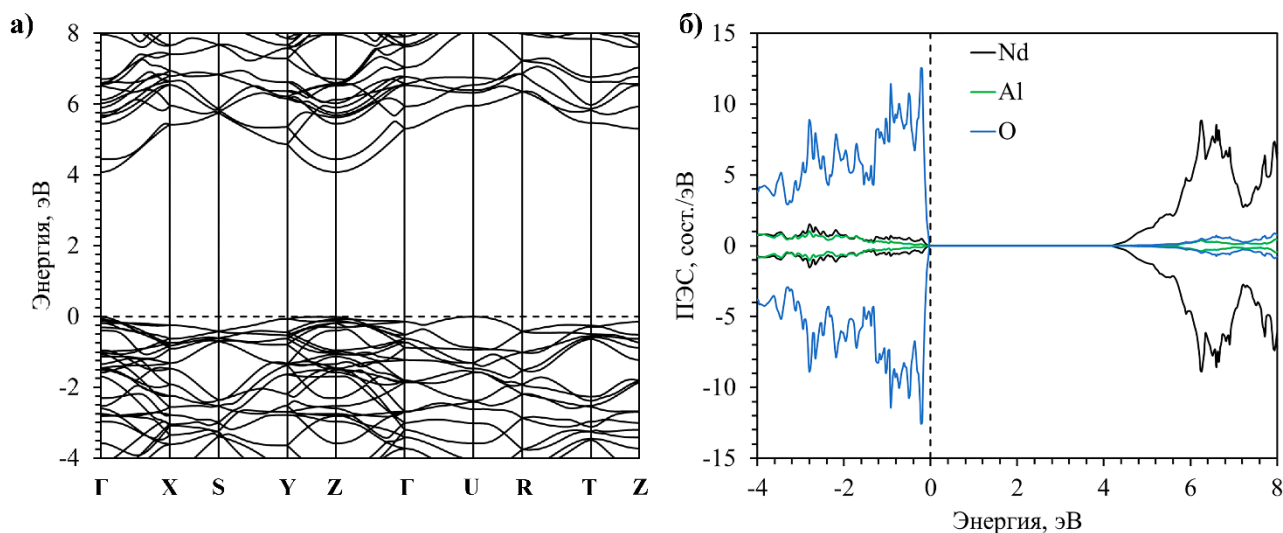


Рисунок 1 – Дисперсия зон вдоль точек высокой симметрии (а); плотность электронных состояний (ПЭС) (б).

На рисунке 1б приведена атомно-проецированная плотность электронных состояний, получаемая суммированием всех состояний для каждого сорта атомов. Валентная зона образована преимущественно состояниями, связанными с ионами кислорода, тогда как зона проводимости формируется за счет состояний, связанных с ионами неодима, в то время как вклад от состояний, связанных с ионами алюминия мал во всем исследуемом масштабе, а вблизи потолка валентной зоны и особенно дна зона проводимости вообще близок к нулю.

Таким образом, ортоалюминат неодима, как и ортоалюминат иттрия собой диэлектрик. Исходя из строения зоны проводимости можно предположить, что при малых концентрациях ионов неодима в  $\text{YAlO}_3$ , они образуют примесные уровни на 1,5–2 эВ ниже дна зоны проводимости, которые сливаются в примесную зону с ростом концентрации неодима, объединяющуюся с дном зоны проводимости в  $\text{NdAlO}_3$ . Незначительная роль ионов алюминия в электронном строении позволяет предположить их замещение другими ионами, в частности, магнитными, может привести к появлению магнитных свойств за счет активации механизма косвенного суперобмена, что привлекательно для создания мемристоров и спинтронных устройств, а также элементов энергонезависимой памяти. Уменьшение энергетического зазора также может способствовать нивелированию процессов безызлучательной рекомбинации в люминофорах на основе исследуемого материала. Показано, что использование псевдопотенциального приближения открытого остова позволяет корректно учесть влияние  $4f$ -электронов на остальные валентные электроны без необходимости их непосредственно самосогласованного расчета, что, с свою очередь, дает возможность эффективно исследовать электронную структуру соединений, содержащих ионы лантаноидов, сокращая временные и вычислительные затраты.

Выполнение работы частично поддержано в рамках задания 2.17 ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» (ГБЦ 21-3121).

#### Список литературы

1. Pena M. A., Fierro J. L. G. Chemical structures and performances of perovskite oxides // Chem. Rev. – 2001. – Vol. 101, Iss 7. – P. 1981–2017.
2. Huang L., Jia Z., Kyymissis I., O'Brien S. High-K Capacitors and OFET Gate Dielectrics from Self-Assembled  $\text{BaTiO}_3$  and  $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$  Nanocrystals in the Superparaelectric Limit // Adv. Func. Mater. – 2010. – V. 20, Iss. 4. – P. 554–560.
3. Gao J, Xue D, Liu W, Zhou C, Ren X. Recent Progress on  $\text{BaTiO}_3$ -Based Piezoelectric Ceramics for Actuator Applications // Actuators. – 2017. – Vol. 6, Iss. 3. – P. 24-1–24-20.
4. Podhorodecki A., Gaponenko N. V., Zatoryb G., Molchan I. S., Motyka M., Serafinczuk, Golacki L. W., Khoroshko L. S., Misiewicz J., Thompson G. E. Ion-ion interaction in two-dimensional nanoporous alumina filled with cubic  $\text{YAlO}_3:\text{Tb}^{3+}$  matrix // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – P. 355302-1–355302-12.
5. Хорошко Л. С., Баглов А. В. Магнитные конфигурации в мультиферроике  $\text{YFeO}_3$  // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния. Матер. 6-й междунар. науч.-прак. конф. / г. Минск (май 2021 г.). – Мн., 2021. – С. 251–253.
6. Бухараев А. А., Звездин А. К., Пятаков А. П., Фетисов Ю. К. Стрейнтроника – новое направление микро- и наноэлектроники и науки о материалах // УФН. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330.
7. Streck W., Marciniak L., Hreniak D., Lukowiak A. Anti-Stokes bright yellowish emission of  $\text{NdAlO}_3$  nanocrystals // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 111, Iss. 2. – P. 024305-1–024305-6.
8. Ozaki T. Variationally optimized atomic orbitals for large-scale electronic structures // Phys. Rev. B. – 2003. – V. 67, Iss. 15. – P. 155108-1–155108-5.
9. Ozaki T., Kino H. Numerical atomic basis orbitals from H to Kr // Phys. Rev. B. – 2004. – V. 69, Iss. 19. – P. 195113-1–195113-19.

УДК 621.372.8, 535

Стаськов Н. И.<sup>1</sup>, Лашковская Е. И.<sup>2</sup>, Гапоненко Н. В.<sup>2</sup>, Корнилова Ю. Д.<sup>2</sup>,  
Омельченко А. А.<sup>3</sup>, Пилипенко В. А.<sup>3</sup>, Чудаков Е. А.<sup>1</sup>, Сотский А. Б.<sup>1</sup>, Сотская Л. И.<sup>4</sup>,  
Бойко А. А.<sup>5</sup>, Семченко А. В.<sup>6</sup>

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРБИЯ ПО ТОЛЩИНЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова, Могилев, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белмикросистемы НТЦ Филиал ОАО Интеграл, Минск, Беларусь

<sup>4</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

<sup>5</sup>Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь

<sup>6</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Беларусь

В данной работе представлены результаты оптического анализа однослойных пленок титаната бария, легированных эрбием, сформированных центрифугированием с окончательной термообработкой при температуре 450°C.

Легированные лантаноидами пленки титаната бария, сформированные золь-гель методом с различными режимами термообработки, представляют интерес для разработки канальных волноводных структур [1], оптических микрорезонаторов и люминесцентных покрытий [2, 3]. Цель данной работы – определение оптических характеристик однослойных пленок BaTiO<sub>3</sub>:Er, сформированных центрифугированием с окончательной термообработкой при 450°C.

На подложки из монокристаллического кремния золь-гель технологией наносили однослойные пленки титаната бария (BaTiO<sub>3</sub>) и пленки BaTiO<sub>3</sub>, легированные Er (BaTiO<sub>3</sub>:Er). Длительность отжига пленок при температуре 450°C – 30 мин. Золь титаната бария готовили на основе уксусной кислоты (CH<sub>3</sub>COOH), ацетилацетона (CH<sub>3</sub>-CO-CH<sub>2</sub>-CO-CH<sub>3</sub>), изопропоксида титана (Ti(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>) и ацетата бария (Ba(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>). Количества изопропоксида титана и ацетата бария было выбрано таким образом, чтобы соотношение Ti/Ba соответствовало стехиометрическому составу титаната бария в плёнке. Для формирования золя, содержащего эрбий, к раствору добавляли гидрат ацетата эрбия (Er(CH<sub>3</sub>COO)<sub>3</sub>·xH<sub>2</sub>O). Концентрации BaTiO<sub>3</sub> и Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в золях составляли 60,0 мг/мл и 1,5 мг/мл соответственно.

Для расчета параметров электродинамических и дисперсионных моделей пленок использовали программное обеспечение DeltaPsi2, установленное на спектральном эллипсометре UVISEL2 (HORIBA, Франция). Эллипсометрические характеристикам Is и Ic (рис. 1а, 2а) измеряли в спектральной области от 200нм (6.2eV) до 800нм (1.55eV) при углах падения 64, 67, 70 и 73°.

В области прозрачности кварцевых подложек (от 225 нм до 800 нм) спектры  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  ( $N = n - ik$ ) пленок BaTiO<sub>3</sub> (T=450°C) удачно ( $\chi^2=0.073$ ) аппроксимированы [4] дисперсионными функциями новых аморфных материалов с одним осциллятором (NAM)

$$n(\omega) = n_{\infty} + [B(\omega - \omega_j) + C] \left[ (\omega - \omega_j)^2 + \Gamma_j^2 \right]^{-1};$$

$$k(\omega) = \begin{cases} f_j (\omega - \omega_g)^2 \left[ (\omega - \omega_j)^2 + \Gamma_j^2 \right]^{-1}, & \omega > \omega_g; \\ 0, & \omega \leq \omega_g \end{cases};$$

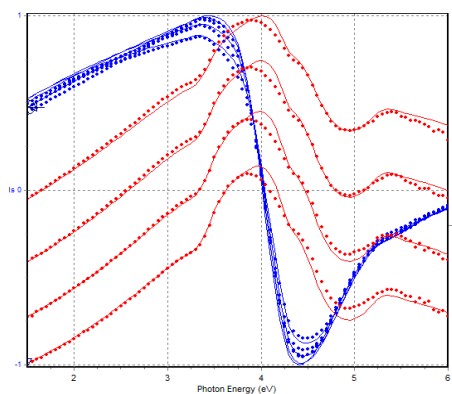
$$B = f_j \Gamma_j^{-1} \left[ \Gamma_j^2 - (\omega_j - \omega_g)^2 \right];$$

$$C = 2f_j \Gamma_j (\omega_j - \omega_g).$$



#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Эти формулы содержат параметр  $\omega_g$  – ширина запрещенной зоны. Предполагается, что при энергии фотона  $\omega > \omega_g$  пленка поглощает свет. Область прозрачности пленки определяется условием  $\omega \leq \omega_g$ . Край полосы поглощения находят по формуле  $\lambda_g = 1240\omega_g^{-1}$  ( $\lambda$  в нм, если  $\omega$  в эВ). Вышеприведенные формулы получены из уравнений Форухи-Блумера. Индекс  $j=1,2,3$  указывает на возможность моделирования сред в виде набора осцилляторов с разными характеристиками. С помощью эффективной среды Бруггемана был учтен поверхностный шероховатый слой (рисунок 1b) на пленке, рассчитана ( $\chi^2=5.24$ ) толщина пленки ( $L_1 = 34.1nm$ ), толщина шероховатого слоя  $L_2 = 18.4nm$  и пять параметров ( $n_\infty, \omega_j, f_j, \Gamma_j, \omega_g$ ) функции NAM. В шероховатом слое содержится 10.7% BaTiO<sub>3</sub>. Наибольшее отличие (рисунок 1a) измеренных и рассчитанных параметров приходится на область полосы собственного поглощения BaTiO<sub>3</sub>. На рисунке 1c приведены результаты расчетов восьми параметров функции NAM ( $\chi^2=2.94$ ) с двумя осцилляторами. Толщина пленки в этом случае практически не изменилась ( $L_1 = 35.8nm$ ).



(a)

$\chi^2$ minimization on Is,Ic		
$I_s = \sin(2\Psi) \times \sin(\Delta), I_c = \sin(2\Psi) \times \cos(\Delta)$		
$\chi^2 = 5.236626$		
Iterations Number = 25		
Parameters		
1) L1 Thickness [Å]	=	341.415 ± 1.566
2) L2 Thickness [Å]	=	183.782 ± 36.784
3) L2 % BaTiO3_nam.dsp	=	10.73 ± 2.40
4) BaTiO3_nam n $\infty$	=	1.8476050 ± 0.0074
5) BaTiO3_nam $\omega_g$	=	3.7400450 ± 0.0208
6) BaTiO3_nam f <sub>j</sub>	=	0.2496136 ± 0.0074
7) BaTiO3_nam $\omega_j$	=	4.6149820 ± 0.0180
8) BaTiO3_nam $\Gamma_j$	=	1.0364800 ± 0.0162

(b)

$\chi^2$ minimization on Is,Ic		
$I_s = \sin(2\Psi) \times \sin(\Delta), I_c = \sin(2\Psi) \times \cos(\Delta)$		
$\chi^2 = 2.939478$		
Iterations Number = 33		
Parameters		
1) L1 Thickness [Å]	=	357.970
2) L1 T % BaTiO3_nam.dsp	=	100.00
3) BaTiO3_nam n $\infty$	=	1.8639040
4) BaTiO3_nam $\omega_g$	=	3.9430720
5) BaTiO3_nam f <sub>1</sub>	=	0.0617865
6) BaTiO3_nam $\omega_1$	=	3.9239840
7) BaTiO3_nam $\Gamma_1$	=	-0.4317386
8) BaTiO3_nam f <sub>2</sub>	=	0.2988822
9) BaTiO3_nam $\omega_2$	=	4.6101440
10) BaTiO3_nam $\Gamma_2$	=	0.9056448

(c)

Рисунок 1 – (a) – Рассчитанные и измеренные эллипсометрические параметры Is, Ic пленки BaTiO<sub>3</sub>:Er; (b) – функция NAM с одним осциллятором; (c) – функция NAM с двумя осцилляторами

На рисунке 2a представлены измеренные и рассчитанные ( $\chi^2=1.65$ ) эллипсометрические характеристикам Is и Ic градиентной пленки BaTiO<sub>3</sub>:Er с линейной зависимостью диэлектрической проницаемости ( $\epsilon(L_1) = N^2(L_1)$ ) от толщины пленки, которая отсчитывается от границы раздела (Т) шероховатый слой – пленка до границы раздела(В) пленка – подложка. Толщина пленки в пределах погрешностей остается прежней ( $L_1 = (35.5 \pm 2.3)nm$ ).

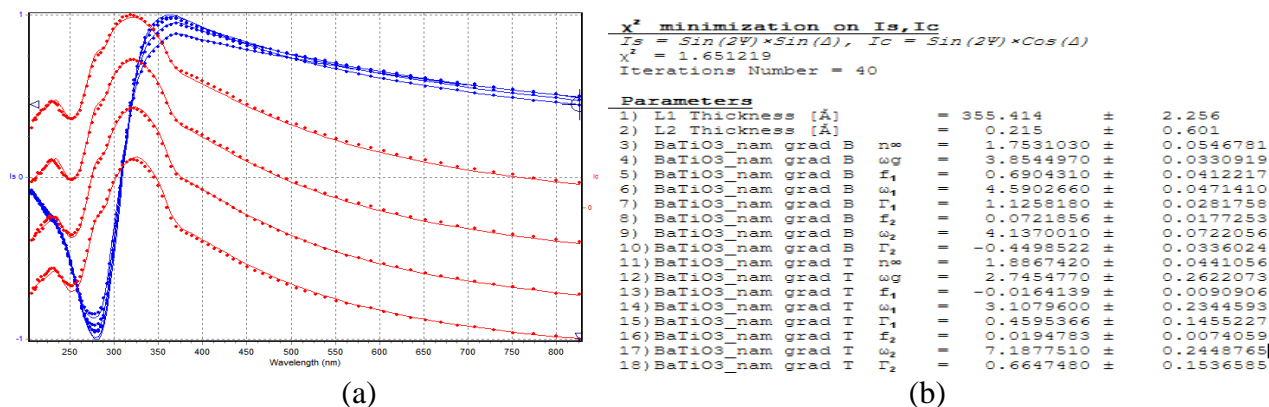


Рисунок 2. (a) – рассчитанные и измеренные эллипсометрические параметры  $I_s, I_c$  пленки BaTiO<sub>3</sub>:Er; (b) – функция NAM с двумя осцилляторами для градиентной пленки; T– верх пленки; B – низ пленки.

Полученные параметры электродинамических и дисперсионных моделей позволяют определить оптические характеристики пленки BaTiO<sub>3</sub>:Er и предположить, что Er выталкивается в приповерхностный слой пленки. Ширина запрещенной зоны этого слоя 2.75eV. Ширина запрещенной зоны более глубинного слоя (3.85eV) близка к ширине запрещенной зоны чистого BaTiO<sub>3</sub> (3.63eV) [4].

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

#### Список литературы

1. Petraru A., Schubert J., Schmid M., Buchal Ch. Ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> thin-film optical waveguide modulators // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 81, N 8. – P. 1375 (3 pages).
2. Lashkovskaya E. I., Gaponenko N. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Andreev B. A., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Labunov V. A., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A., Timoshenko V. Yu. Optical properties and upconversion luminescence of BaTiO<sub>3</sub> xerogel structures doped with erbium and ytterbium // Gels. — 2022. — Vol. 8, N 6. — P. 347 (15 pages).
3. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Yu. D., Lashkovskaya E. I., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Labunov V. A., Radyush Yu. V., Chubenko E. B., Timoshenko V. Yu. Upconversion luminescence from sol-gel-derived erbium- and ytterbium-doped BaTiO<sub>3</sub> film structures and the target form // Photonics. — 2023. — Vol. 10, N 4. — P. 359 (12 pages).
4. Staskov N. I., Sotsky A. B., Miheev S. S., Gaponenko N. V., Kholov P. A., Raichenok T. F. Optical characteristics of annealed barium titanate films formed by the sol-gel method // J. Appl. Spectrosc. – 2021. – Vol. 87, N 6. – P. 1050 – 1056.

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ INGAZNO**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Беларусь

В работе представлены результаты исследования тонкопленочных транзисторных структур на основе полупроводникового соединения InGaZnO (IGZO), формируемого методом магнетронного плазмохимического осаждения. Исследованы их структурно-морфологические и электрофизические свойства. Полученные слои характеризуются высокой подвижностью носителей заряда и прозрачностью, что позволяет их использовать при изготовлении ЖК- и OLED – активно-матричных дисплеев нового поколения.

**Введение**

InGaZnO (IGZO) представляет собой аморфный прозрачный проводящий оксид n-типа. Интерес к получению и исследованию таких оксидов особенно возрос в последние годы с развитием так называемой «гибкой» электроники, поскольку IGZO является идеальным материалом по нескольким причинам, а именно его оптическим свойствам, аморфной природе и возможности формировать пленки низкотемпературными методами [1, 2].

IGZO-материал продемонстрировал многообещающие результаты в широком спектре применений, включая прозрачные тонкопленочные транзисторы (ТПТ). При этом тонкопленочные транзисторы представляют особый интерес, поскольку широко используются для активно-матричной адресации ЖК- и OLED – телевизоров, ноутбуков, смартфонов и др., в том числе на гибких носителях. Несмотря на то, что аморфный и поликристаллический кремний, а также разнообразные органические полупроводниковые материалы широко используются в таких устройствах в настоящее время, их недостатки хорошо известны и практически малоустраняемы. Так, например, аморфный кремний ( $\alpha$ -Si) непрозрачен в видимой области спектра, имеет малую подвижность носителей заряда и, следовательно, низкое быстродействие ТПТ, высокую фоточувствительность. Сравнительный анализ электрофизических свойств IGZO и других материалов, используемых при формировании ТПТ, приведен в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение свойств InGaZnO и других материалов, используемых в качестве активного слоя в ТПТ

Материал	$\alpha$ -IGZO	$\alpha$ -Si	poly-Si	органические полупроводники	ZnO
Подвижность при полевом эффекте, $\text{см}^2/\text{В}$	3-35	0,5-1	30-300	0,1	20-50
Температура формирования, $^{\circ}\text{C}$	<200 $^{\circ}\text{C}$	~350 $^{\circ}\text{C}$	450 $^{\circ}\text{C}$	<150 $^{\circ}\text{C}$	~300 $^{\circ}\text{C}$
Коэффициент пропускания, %	>80%	<20%	<20%	>80%	>80%
Однородность на больших площадях	Хорошая	Хорошая	Плохая	Хорошая	Плохая
Тип подложки	Стекло, пластик, бумага	Стекло	Кварц	Стекло, пластик	Стекло, пластик

Как видно из таблицы 1, IGZO обладает комплексом преимуществ перед Si из-за высокой прозрачности, а также более низкими температурами осаждения на различные типы подложек, включая гибкие. Кроме того, это позволяет эффективно использовать технологию R2R (roll-to-roll, с рулона-на-рулон). Относительно более простой метод осаждения – распыление IGZO-мишени в газовой среде при варьировании параметров процесса позволяет прецизионно контролировать электрооптические свойства получаемого материала. Основное преимущество IGZO перед органическими полупроводниками – стабильность свойств и зна-

чительно более высокая подвижность носителей заряда при полевом эффекте [3, 4]. Таким образом, баланс требуемых свойств, присущих IGZO, делает его перспективным материалом оптоэлектроники, фотоники и дисплейной техники.

### Изготовление тестовых структур

На стеклянных подложках размером 60,0x48,0x1,1 мм были сформированы массивы тонкоплёночных транзисторных тестовых структур, отличающихся толщиной активного слоя (IGZO), шириной и длиной затвора. На рисунке 1. представлен внешний вид таких ТПТ с различными значениями ширины канала  $w$ :  $w_1=100$  мкм;  $w_2=200$  мкм;  $w_3=400$  мкм;  $w_4=600$  мкм;  $w_5=800$  мкм.

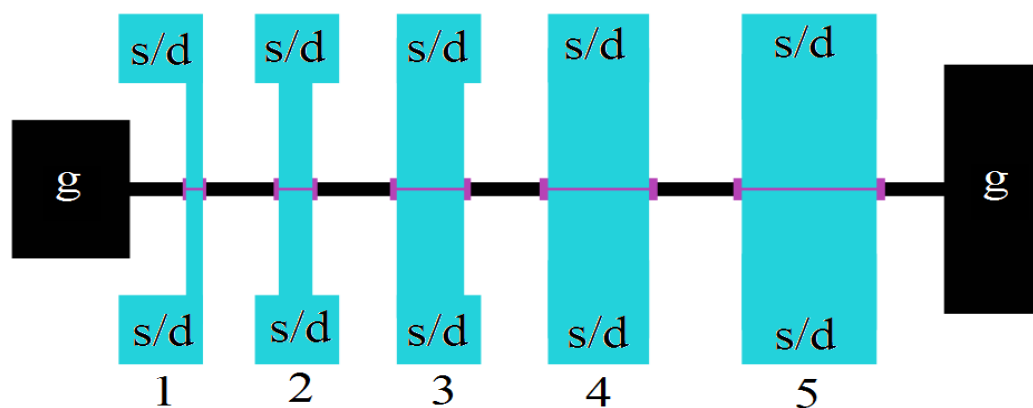


Рисунок 1 – Тестовая структура ТПТ (g-область затвора, s/d – область исток/стока) с ширинами каналов:  $w_1=100$  мкм;  $w_2=200$  мкм;  $w_3=400$  мкм;  $w_4=600$  мкм;  $w_5=800$  мкм.

Формирование тестовых структур происходило в несколько этапов: вначале на стеклянную подложку методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (ПХО) наносили буферный слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 100 нм. Далее формировали затвор из Mo толщиной 200 нм методом магнетронного осаждения. Затворный диэлектрик  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм формировали ПХО методом. Активный слой IGZO с толщинами 75 и 150 нм нанесён магнетронным распылением при расходе Ar 50 sccm и  $\text{O}_2$  10 sccm. Сток/истоковые области толщиной 200 нм получены методом магнетронного напыления. Пассивирующий слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 500 нм сформирован при помощи ПХО. Вскрытие контактных окон производили с помощью «сухого» реактивного ионного травления.

### 1. Экспериментальные результаты

На рисунке 2 представлены типичные вольт-амперные характеристики тестовых структур.

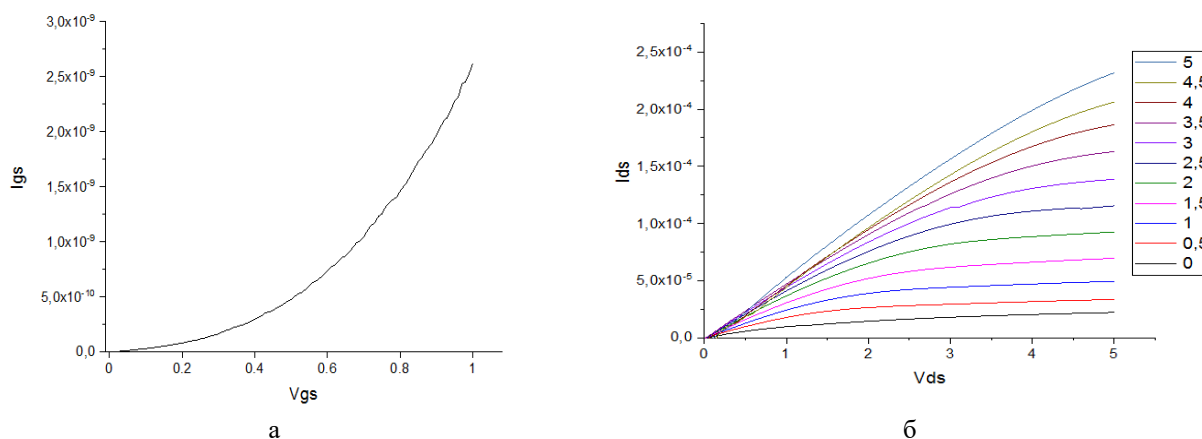


Рисунок 2 – Вольт-амперные характеристики образцов тестовых структур ТПТ с активным слоем IGZO: а – сток-затворная характеристика; б – стоковые характеристики при различных напряжениях на затворе.

Подвижность материала IGZO определяли при помощи четырёхзондового холловского метода на установке Ecoria Hall Effect Measurement Systems HMS-5000. Типичные значения подвижности носителей в активном слое для образцов тестовых структур ТПТ составляли 4 – 5 см<sup>2</sup>/В с.

### **Заключение**

Методом магнетронного плазмохимического осаждения на стеклянную подложку полупроводникового соединения InGaZnO сформированы тонкопленочные транзисторные структуры. Экспериментально исследованы их ВАХ и основные электрофизические характеристики. Показана возможность существенного улучшения достигнутых параметров за счет оптимизации технологии формирования исследуемых структур.

### **Благодарность**

Работа выполнена в рамках задания 1.4 ГНПИ «Материаловедение, новые материалы и технологии». Выражаем также благодарность сотрудникам ОАО «ИНТЕГРАЛ» за предоставленную возможность использования контрольно-измерительного оборудования при исследовании ВАХ тестовых образцов.

### **Список литературы**

1. Hosono H., et al. Transparent Amorphous Oxide Semiconductors for High Performance ТПТ, SID'07, Dig., 2007. pp.1830.
2. Nomura K., et al. Origins of threshold voltage shifts in room-temperature deposited and annealed a-In–Ga–Zn–O thin-film transistors. Applied Physics Letters, 95, 013502, 2009.
3. Suresh A. and Muth J. F. Bias stress stability of indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors. Applied Physics Letters, 92(3):033502, 2008.
4. Kamiya T., Nomura K., and Hosono H. Present status of amorphous In–Ga–Zn–O thin-film transistors. Science and Technology of Advanced Materials. Vol. 11, no. 4, Aug. 2010. P. 044305.

Стогний А. И., Серокурова А. И., Новицкий Н. Н.

**СТОЙКОСТЬ ПЛЕНОЧНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР Be/BeO, Al/AlO<sub>x</sub> К РАСПЫЛЕНИЮ МЕДЛЕННЫМИ ИОНАМИ O<sup>+</sup>: МАСКИ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ**

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», Минск, Беларусь

В работе исследованы сравнительные процессы распыления слоев бериллия и алюминия пучками ионов кислорода, энергия которых варьировалась от 300 до 600 эВ. Предложена феноменологическая модель, объясняющая полученные результаты исходя из разности масс и химической активности бериллия и алюминия. Разработаны двухслойные маски для анизотропного травления р-слоев GaN, Si, Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. Данные структуры составляют основу магнетонных и магнитоплазмонных кристаллов для формирования дискретных элементов средств современной информатики СВЧ диапазона частот.

Интерес к магнетонным структурам и наличие новых возможностей, позволяющих создавать более сложные – трёхмерные структуры, обеспечивает приоритетный характер полученных результатов исследований, проведённых в работе.

Для сравнительного анализа стойкости наноразмерных структур, а также определения перспектив использования их в качестве масок для получения анизотропных профилей травления металлические маски были получены распылением ионами аргона мишеней соответствующего состава и чистотой лучше 99,9%, а BeO и AlO<sub>x</sub> – пучком ионов кислорода в раздельных вакуумных процессах. Метод ионно-лучевого распыления металлических мишеней ионами аргона широко используется для получения изотропных и анизотропных профилей травления структур магнетоники и магнитоплазмоники [1–5]. Особенностью ионно-лучевого метода является получение высокооднородных металлических пленок с плоскопараллельными интерфейсными границами независимо от химической природы интерфейсной границы.

Распыление металлических мишеней пучком ионов кислорода с энергией от 300 до 600 эВ показало, что Be, который легче атома кислорода и Al, сравнимый с ним по массе, распыляются в разы медленнее, чем более тяжелые металлические мишени при плотности тока пучка положительных ионов кислорода менее 0,4 мА/см<sup>2</sup>, рабочее давление кислорода менее 3×10<sup>-4</sup> Тор и предельном вакууме менее 2×10<sup>-5</sup> Тор. Было установлено, что основной причиной этого факта является формирование «затеняющего» процессы распыления поверхностного слоя BeO и AlO<sub>x</sub> толщиной порядка нанометра (не превышающего длину пробега атома кислорода в мишени) и направленность движения атомов легких металлов вглубь мишени поле прямого столкновения с налетающим атомом кислорода.

Полученные результаты поясняет предложенная ниже феноменологическая модель. Качественная модель ускоренного распыления Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> по сравнению с Al, Be медленными ионами кислорода может быть представлена следующим образом. Процесс распыления ионами кислорода мишеней Al/AlO<sub>x</sub>, Be/BeO и Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> протекает в условиях прямых механических столкновений, включающих в идеальных условиях абсолютно упругие и абсолютно неупругие удары как крайние случаи. Воспользуемся известным выражением  $E_i^E = eU\gamma_i^E \cos \theta$ , где  $\gamma_i^E = 4 \frac{M_0 M_i}{(M_0 + M_i)^2}$  – параметр, характеризующий обмен энергией при упругом ударе, здесь  $M_{Be} = 9 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_{Be} = 0.92$ ,  $M_O = 16 \text{ а.е.}$ ,  $M_{Al} = 27 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_{Al} = 0.94$ ,  $M_Y = 89 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_Y = 0.52$ ,  $M_{Fe} = 56 \text{ а.е.}$ ,  $\gamma_{Fe} = 0.69$ . В случае неупругого удара доля переданной энергии характеризуется параметром  $\alpha_i = \frac{M_i}{M_0 + M_i}$  – где  $\alpha_{Be} = 0.36$ ,  $\alpha_{Al} = 0.63$ ,  $\alpha_{Ni} = 0.80$ ,  $\alpha_Y = 0.85$ ,  $\alpha_{Fe} = 0.78$  для бериллия, алюминия, никеля, иттрия и железа, соответственно. Заметим, что в рассматриваемых условиях  $eU \leq 10E_{пор} \approx 500 \dots 600$  эВ, где E – пороговая энергия, необходимая для распыления атома из мишени, а плотность ионов кислорода в потоке

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

$n_{O^+} \ll \rho_{\text{пов}} \sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$  существенно меньше поверхностной концентрации атомов, т.к.  $n_{O^+} < 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при плотности тока пучка  $j < 0.5 \text{ мА/см}^2$ .

Таким образом, при столкновении с более легкими Al и Be ионы кислорода сравнительно больше энергии расходуют на упругие столкновения, чем с более тяжелыми Y и Fe. При неупругих столкновениях наблюдается обратное. Это является основанием для более интенсивного протекания процессов прямого вбивания атомов Be и Al вглубь маски по сравнению с более тяжелыми атомами мишени. В мишени, наоборот, в поверхностном слое более интенсивно накапливается энергия при торможении ионов кислорода, которая в дальнейшем расходуется на процессы распыления. Данная модель демонстрирует, что при облучении ионами кислорода в результате процессов торможения при налете и перемешивании формируются поверхностные слои условного состава  $\text{MeO}_x$ . Их толщина в основном определяется в данных условиях массой и химической активностью металла. Бериллий является самым легким и наиболее химически активным в данном ряду, его слой имеет относительно большую толщину, но и является относительно более рыхлым. С другой стороны, как следует из представленных выше качественных рассуждений, наименьшую скорость распыления имеет бериллий и слой Be/BeO, но при его распылении формируется сильно шероховатый рельеф, поэтому данный слой перспективен для получения неглубоких профилей травления. Пара Al/ $\text{AlO}_x$  занимает промежуточное положение ввиду его однородности и наиболее легких условий получения толстых слоев ионным распылением, наиболее перспективен для получения глубоких профилей травления.

Это позволило разработать двухслойные маски для анизотропного травления Be/BeO толщиной до 100 нм для анизотропного травления р-слоев GaN, а также наноразмерных слоев Au и  $\text{V}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при изготовлении двухрешеточных магнитоплазмонных кристаллов (рисунок 1).

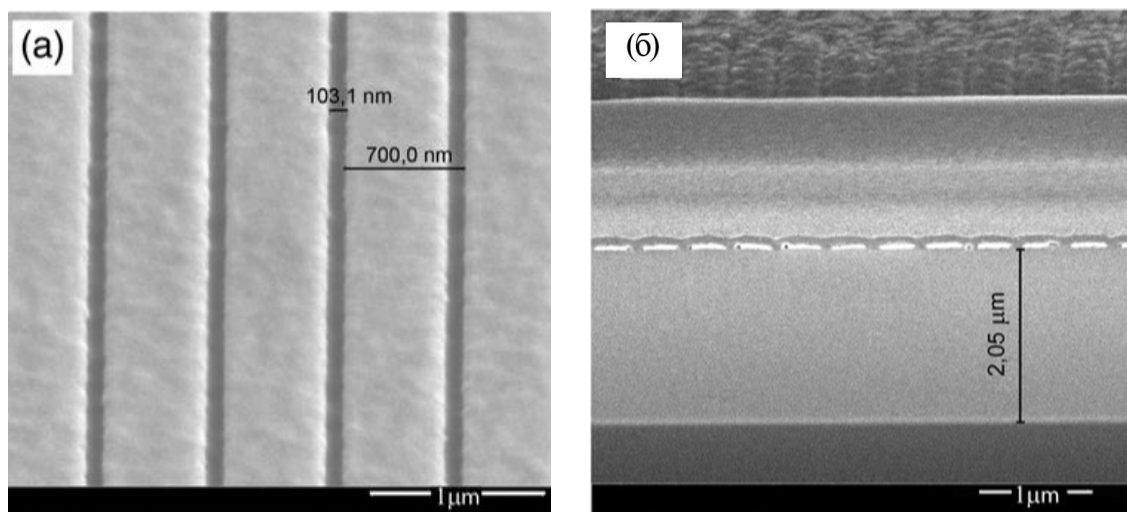


Рисунок 1 – РЭМ-изображения а) вида сверху и б) поперечного сечения инкапсулированных плазмонных кристаллов с периодом 700 нм

В работе получены маски Al/ $\text{AlO}_x$ /Al, где толщина слоев Al не превысила 0,4 мкм, а  $\text{AlO}_x$  – 0,1 мкм для травления на глубину до 2 мкм слоев на основе GaN и изготовления анизотропных профилей травления до 4 мкм в феррит-гранатах (рисунок 2).

Селективность процесса распыления составляла 6-8 нм/мин при использовании масок Be/BeO и 4-6 нм/мин при использовании масок Al/ $\text{AlO}_x$ /Al. Процесс распыления GaN протекал путем формирования и откачки летучих комплексов  $\text{NO}_x$  и образования тонкого слоя  $\text{GaO}_x$ , а атомы Ga ( $M=69,7$  а.е) при ударе медленными атомами кислорода ( $M=16$  а.е) приобретают преимущественно импульс в направлении от поверхности мишени.

Процесс распыления феррит-гранатов  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  для исследования СВЧ-процессов и с замещениями редкоземельными элементами для исследования магнитооптических свойств

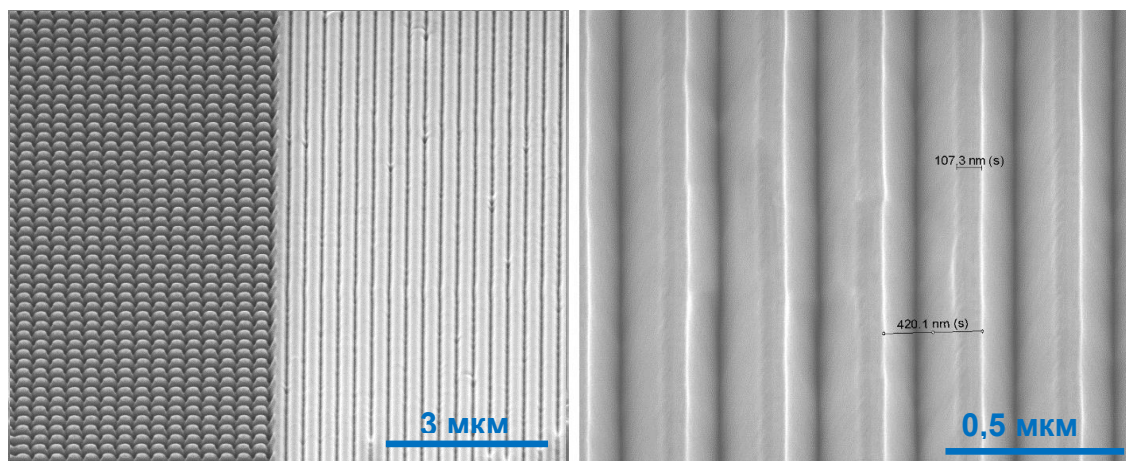


Рисунок 2 – РЭМ-изображения дискретных гетероструктур YIG /Si

происходил почти в два раза быстрее (0,2-0,25 мкм/ч), чем GaN (0,1 мкм/ч) благодаря более тяжелому весу металлов в составе гранатов.

На основе совокупного анализа представленных экспериментальных данных и феноменологической модели были сформированы 1D и 3D периодические структуры (рис. 1-2) в виде слоев представленных металлов, их комбинаций и комбинаций их тонких окисленных слоев. В докладе будут представлены данные оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, включая профили поперечного сечения, электронно-зондового микроанализа, иллюстрирующие представленные результаты. Особенное внимание в докладе будет уделено получению тонких слоев масок без проколов и структурных образований в виде гранул и столбцов, которые при длительных процессах распыления способствуют неравномерному по толщине уходу маски и формированию на рабочей поверхности шероховатого рельефа.

Исследование выполнено за счёт гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Т23РНФ-010 и Российского научного фонда №23-43-10004

#### Список литературы

1. R. Gieniusz, P. Gruszecki, M. Krawczyk, U. Guzowska, A. Stognij & A. Maziewski The switching of strong spin wave beams in patterned garnet films // *Scientific Reports* | 7: 8771
2. G.P. Yablonskii, A.L. Gurskii, V.N. Pavlovskii, E.V. Lutsenko, V.Z. Zubialevich, T.S. Shulga, A.I. Stognij, H. Kalisch, A. Szymakowski, R.H. Jansen, A. Alam, B. Schineller, M. Heuken, Carrier diffusion length measured by optical method in GaN epilayers grown by MOCVD on sapphire substrates // *Journal of Crystal Growth*, Volume 275, Iss. 1–2, 2005, Pp e1733-e1738
3. V. K. Sakharov, E. N. Beginin, Y. V. Khivintsev, A. V. Sadovnikov, A. I. Stognij, Y. A. Filimonov and S. A. Nikitov // *Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics* *Appl. Phys. Lett.* 117, 022403 (2020);
4. Artsiom Kazlou, Alexander L. Chekhov, Alexander I. Stognij, Ilya Razdolski, Andrzej Stupakiewicz. Surface Plasmon-Enhanced Photomagnetic Excitation of Spin Dynamics in Au/YIG:Co Magneto-Plasmonic Crystals // *ACS Photonics* 2021, 8 2197-2202.
5. A. I. Stognij, L. Lutsev, N. N. Novitskii, A. V. Bepalov, O. N. Golikova, V. A. Ketsko, R. Gieniusz and A. Maziewski, Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin Y3Fe5O12 films sputtered on GaN-based substrates // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48 (2015) 485002-8.



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Mg–Cu

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Сканирующая зондовая микроскопия использована для получения информации об ансамбле шероховатости поверхностей с различными типами рельефа быстрозатвердевших фольг сплава Al–Mg–Cu–Mn–Fe. Размер поля сканирования был равен 20×20 мкм и 50×50 мкм. Обнаружено, что субструктура фольг в зависимости от поверхности анализа характеризуется наличием внутризеренных областей (ячеек) размером 0,5–3,0 мкм. Средняя арифметическая шероховатость поверхности фольг, контактирующей с закалочным барабаном, составляет 112,2 нм при сканировании участков 20×20 мкм. Для областей фольг, имеющих ячеистую структуру, установлено снижение шероховатости поверхности. Получено, что с увеличением размера поля сканирования морфологическая неоднородность поверхности фольг растет. Гистограммы распределения неровностей аппроксимированы нормальным распределением.

Известно, что в различных областях промышленности, в том числе порошковой металлургии и авиакосмической отрасли, среди широко используемых материалов важное место занимают термические упрочняемые сплавы системы Al–Mg [1]. Совместное легирование алюминия Cu и Mg позволяет улучшить показатели прочности и пластичности за счет увеличения концентрации вакансий и дислокаций в сплавах, приводя к образованию и измельчению зон Гинье-Престона. В равновесии с алюминиевым твердым раствором находятся двойные фазы  $\theta$  (Al<sub>2</sub>Cu) и Al<sub>8</sub>Mg<sub>5</sub> и тройные фазы Al<sub>2</sub>CuMg (*S*) и Al<sub>6</sub>CuMg<sub>4</sub> (*T*). Они характеризуются переменной растворимостью в алюминии, что позволяет осуществлять термическую обработку для улучшения свойств сплавов без изменения их химического состава. Наибольший эффект упрочнения наблюдается благодаря присутствию *S*-фазы [2, 3], которая также положительно влияет и на жаропрочные свойства. Получение сплавов при высоких скоростях охлаждения (порядка 10<sup>6</sup> К/с) дополнительно позволяет повысить физико-механические свойства материалов за счет увеличения растворимости легирующих добавок, образования метастабильных фаз, а также измельчения зерен [4]. Поэтому применение методов сверхбыстрой закалки из расплава (СБЗР) считается высокоэффективным для улучшения свойств уже известных сплавов и расширения их области применения.

Целью данной работы было исследовать морфологию и топографию быстрозатвердевших (БЗ) фольг промышленного сплава 1191 системы Al–Mg–Cu с помощью сканирующей зондовой микроскопии. Статистические характеристики рельефа изучались в зависимости от поверхности анализа фольг.

Фольги сплава 1191 (Al-3,17% Mg-1,55% Cu-0,39% Mn-0,15% Fe) (ат.%) были получены методом центробежной закалки, когда капля расплава затвердевает на внутренней поверхности вращающегося медного цилиндра. Скорость охлаждения расплава составляла около 10<sup>6</sup> К/с. Толщина фольг была порядка 40–80 мкм. Морфология поверхности БЗ неотожженных фольг изучалась при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) SOLVER P47 PRO с полем сканирования 20×20 мкм и 50×50 мкм. В программе Image Analysis были определены статистические параметры поверхности по АСМ-изображениям (среднеарифметическая шероховатость  $S_a$ , островершинность  $S_{ka}$  и ассиметричность  $S_{sk}$ ). Гистограммы распределения неровностей анализировались с использованием математического пакета программы OriginPro. Построенные гистограммы распределения высот шероховатости поверхности аппроксимировались функцией Гаусса.

На рис. 1 показаны типичные АСМ-изображения БЗ фольг сплава 1191 с полем сканирования 20×20 мкм и 50×50 мкм. Сторона фольги, которая прилегала к поверхности цилиндра-кристаллизатора (поверхность А), имела блестящую, гладкую поверхность (рис. 1 а). На

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

данной стороне обнаружены раковины микронных размеров, дно которых имело ячеистую структуру. Ячейки характеризовались преимущественно вытянутой формой с размером 0,5–3,0 мкм (рис. 1 в). Противоположная сторона фольги (поверхность Б) была матовой и бугристой, состояла из впадин и выступов. При этом ячеистая структура наблюдалась на всей ее поверхности (рис. 1 д).

Более детальную информацию о рельефе поверхностей исходных фольг сплава 1191 демонстрируют гистограммы распределения высот неровностей поверхностей А и Б. Статистический анализ показал, что средняя шероховатость  $S_a$  площадки  $20 \times 20$  мкм поверхности А составляет 112,2 нм, для поверхности Б – 87,9 нм. Однако, для областей каверн, имеющих ячеистую структуру,  $S_a$  имеет меньшее значение, например, равное 33,1 нм для участка на рис. 1 в. С увеличением поля сканирования поверхности А до  $50 \times 50$  мкм  $S_a$  возрастает до 210,0 нм. Рельеф поверхности А характеризуется следующими параметрами острровершинности и асимметричности:  $S_{sk} = 2,19$ ,  $S_{ka} = 4,97$  и  $S_{sk} = -0,32$ ,  $S_{ka} = 0,059$  для площадок  $20 \times 20$  мкм, изображенных на рис. 1 а и рис. 1 в соответственно, и  $S_{sk} = -0,41$ ,  $S_{ka} = 1,70$  для площадки  $50 \times 50$  мкм на рис. 1 ж. Для площадки  $20 \times 20$  мкм поверхности Б, изображенной на рис. 1 д, получено, что  $S_{sk} = 0,18$ ,  $S_{ka} = 1,14$ . Дополнительно была выполнена аппроксимация гистограмм распределения высот шероховатости в области основного максимума, обусловленного мелкомасштабными шероховатостями, с использованием распределения Гаусса, рис. 1 б, з, е, з. Величина полной ширины на полувысоте (FWHM) нормального распределения, аппроксимирующего гистограммы распределения неровностей, составила 61,1 нм, 97,5 нм, 218,4 нм и 464,4 нм для рис. 1 б, з, е, з соответственно.

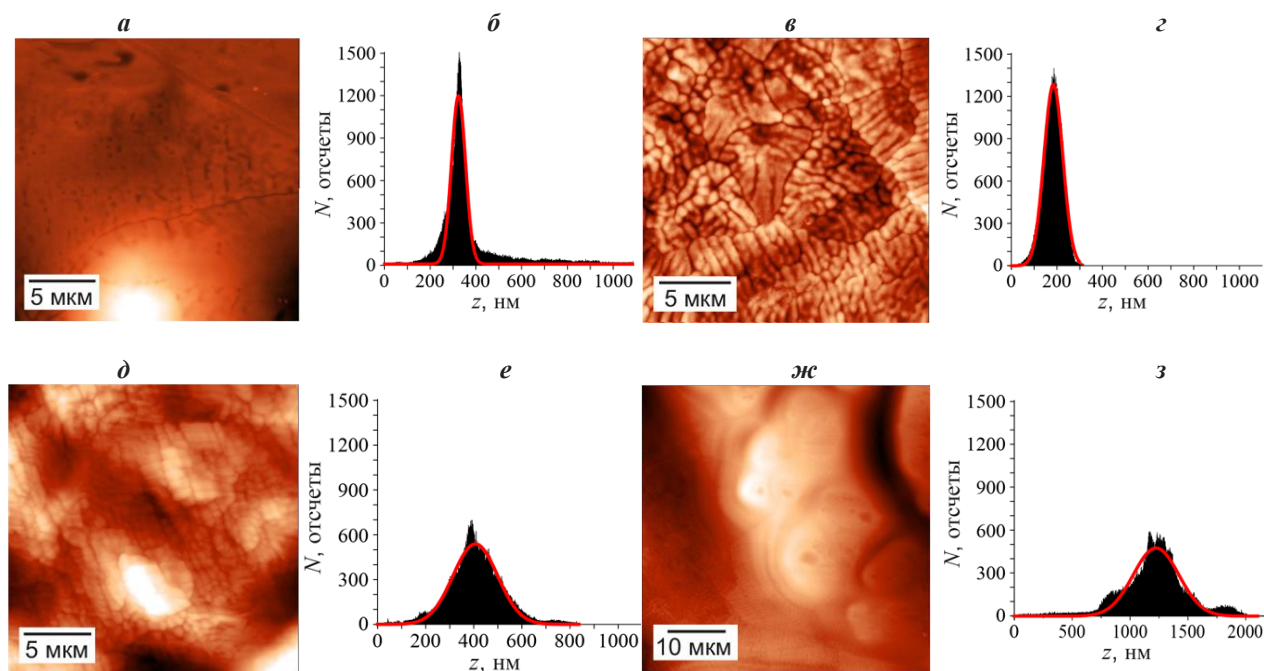


Рисунок 1 – Характерные примеры топографии поверхности БЗ фольг сплава 1191: АСМ-изображения поверхностей А (а, в, ж) и Б (д) в зависимости от размера кадра и соответствующие гистограммы распределения высот шероховатости поверхностей А (б, з, з) и Б (е), аппроксимированные распределением Гаусса.

Процессы кристаллизации определяют морфологию и топографию поверхности БЗ фольг, которые влияют на их физико-механические свойства. При получении фольг методом СБЗР на их поверхности наблюдается образование ячеек в зависимости от стороны анализа. Наличие ячеек в области каверн поверхности А можно объяснить тем, что гладкие участки поверхности, прилегающие к цилиндру, имеют скорость охлаждения больше, чем участки, где образовывались каверны [5]. Ячеистая структура присутствует на всей поверхности Б, поскольку скорость охлаждения свободно затвердевающей поверхности, контактирующей

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

с воздухом, меньше. Исследование методом АСМ показало, что в пределах каждого зерна ячейки преимущественно вытянуты в одном направлении. При сравнении средней шероховатости поверхности дна каверн с другими визуально гладкими участками поверхности А обнаруживается резкое уменьшение  $S_a$  более, чем в 3 раза в случае ячеистой структуры. При этом вид гистограмм распределения высот неровностей двух площадок аналогичен (рис. 1 а, в). Однако, функция распределения по высотам у типичной площадки поверхности А, показанной на рис. 1 а, отличается наличием негауссового хвоста: на рис. 1 б в диапазоне высот от 400 до 900 нм. Проведение аппроксимации гистограмм показало их отклонение от распределения Гаусса в случае многомодовости распределения и согласуется с измеренными значениями параметров островершинности и асимметричности. Получено, что значение среднеарифметической шероховатости значительным образом зависит от размера АСМ-кадра. С увеличением области сканирования до  $50 \times 50$  мкм морфологическая неоднородность поверхности фольг растёт. Гистограмма распределения высот уширяется, что указывает на более развитый рельеф поверхности большей площади.

Представленные результаты указывают на перспективность продолжения исследования влияния легирующих компонентов на процессы структурообразования при высокоскоростной кристаллизации сплавов системы Al–Mg. В работе показано, что метод АСМ хорошо подходит для решения данной задачи, имеющей фундаментальное и прикладное значения, поскольку с его помощью достигается сканирование поверхности фольг с разрешением нанометрового масштаба для получения количественной информации о микроструктуре материала, включая морфологию, а также топографических карт и распределений высот шероховатости поверхности образцов.

Авторы выражают благодарность зав. сектором научных исследований Л.В. Баран (Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований, БГУ) за помощь при проведении экспериментов с использованием метода АСМ.

#### Список литературы

1. Андрюшкин, А. Ю. Производство сварных конструкций в ракетнокосмической технике: учебное пособие / А.Ю. Андрюшкин, О.О. Галинская, А.Б. Сигаев // Балт. гос. техн. ун-т. – 2015. – 104 с.
2. Калинин, Б. А. Физическое материаловедение / Б.А. Калинин, П.А. Платонова, И.И. Чернов, Я.И. Штромбах // М.: МИФИ. – 2008. – 604 с.
3. Zuiko, I. S. Suppression of abnormal grain growth in friction-stir welded Al–Cu–Mg alloy by lowering of welding temperature / I.S. Zuiko, S. Mironov, S. Betsofen, R. Kaibyshev // Scripta Materialia. – 2021. – Vol. 196. – P. 1-4.
4. Kurz, W. Progress in modelling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018 / W. Kurz, M. Rappaz, R. Trivedi // International Materials Reviews. – 2020. – 64(1). – P. 1-47.
5. Шепелевич, В. Г. Структура и механические свойства быстрозатвердевших фольг сплавов Sn–Cd / В. Г. Шепелевич, О. В. Гусакова // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2006. – №12. – С. 98-102.

УДК 535.2

Филиппов В. В.<sup>1</sup>, Семченко А. В.<sup>2</sup>, Грапов Д. В.<sup>1</sup>, Сидский В. В.<sup>2</sup>,  
Маевский А. А.<sup>2</sup>, Данильченко К. Д.<sup>2</sup>

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ТАНТАЛАТА СТРОНЦИЯ

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроник,  
Минск, Беларусь

<sup>2</sup> УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»,  
Гомель, Беларусь

Золь-гель методом синтезированы тонкие пленки на основе танталата стронция, легированные ионами редкоземельных металлов La и Eu, для последующего применения в оптоэлектронике и технике. Приведены результаты исследования их оптических свойств.

В последние годы наблюдается растущий интерес к исследованию и применению перовскитов. Это связано с тем, что перовскиты обладают рядом свойств, которые делают их интересными для использования в СВЧ и оптических устройствах, топологических изоляторах, солнечной энергетике [1-3].

Перовскитные материалы широко изучались как для практических приложений, так и для теоретического моделирования. Наиболее исследованными для оптических и фотонных применений являются титанаты стронция и бария. Что касается танталатов, то в литературе можно найти данные о показателях преломления для длины волны двух кристаллов: кубического танталата калия ( $n=2.2$ ) и тригонального танталата лития ( $n_o=2.188$ ,  $n_e=22.183$ ) [4]. Для пленок (поликристаллических или аморфных) информация о свойствах и оптических постоянных отсутствует. В настоящей работе получены пленки танталата стронция  $SrTaO_3$  и исследованы их оптические свойства.

Тонкие пленки  $SrTaO_3:Me$  с различным содержанием примеси металлов были получены золь-гель методом. Для синтеза золя танталата стронция в качестве исходных соединений использовались этоксид тантала ( $Ti(OC_2H_5)_4$  97%), ацетат стронция  $Sr(CH_3COO)_2$  (реагент ACS 98%), 2-Methoxyethanol ( $CH_3COCH_2CH_2OH$ ) (реагент ACS 98%), изопропанол ( $CH_3CH(OH)CH_3$ ) (реагент ACS 98%, все соединения Sigma-Aldrich, Штайнхайм, Германия) и уксуснокислая кислота ( $CH_3COOH$ ). Легирующие добавки вносились в золь в виде азотнокислых солей соответствующих металлов. Раствор перемешивали электромеханической мешалкой в течение 1 ч до полного растворения всех компонентов, в результате чего образовывался устойчивый пленкообразующий состав.

Перед осаждением золь должен быть выдержан не менее 24 ч. Образцы, представляющие собой слои  $SrTaO_3$  и  $SrTiO_3:Me$ , были получены осаждением, при котором золи наносили на подложку методом центрифугирования. Закреплённую подложку раскручивали до 3000 об/мин. Затем наносили нужное количество слоёв (3 слоя). После нанесения золя его сушили при 200 °C в течение 10 мин. Межслойный отжиг делался при температуре 250 °C в течение 5 минут. Конечный отжиг проводился при температуре 500 °C в течение 1 часа.

Для пленок, сформированных на стекле, в области 300-850 нм для нормального падения света на спектрометре PROSCAN MC 124 были сняты спектры отражения и пропускания. Для пленок на кремниевой подложке доступны только спектры отражения. Дополнительно для них были проведены эллипсометрические измерения на эллипсометре ЛЭФ-3М. Рентгеноструктурные исследования показали, что пленки аморфные.

На рисунке 1 представлены спектры отражения пленок  $SrTaO_3$ , нанесенных на подложку Si, легированных ионами La и Eu. В спектрах наблюдаются два максимума и два минимума, которые носят интерференционную природу. Отличительная особенность этих спектров – это то, что интерференционные максимумы не касаются кривой спектра отражения подложки – кремния. Это может быть в двух случаях: если пленка поглощающая, или пленка

неоднородная по показателю преломления. Чтобы установить наличие поглощения в пленке были проведены эллипсометрические измерения на длине волны 632.8 нм. Из них были найдены показатели преломления  $n_1$  и экстинкции  $k_1$  материала пленок на длине волны 632.8 нм, а также их толщины  $h$ . Для пленки La:SrTaO<sub>3</sub>

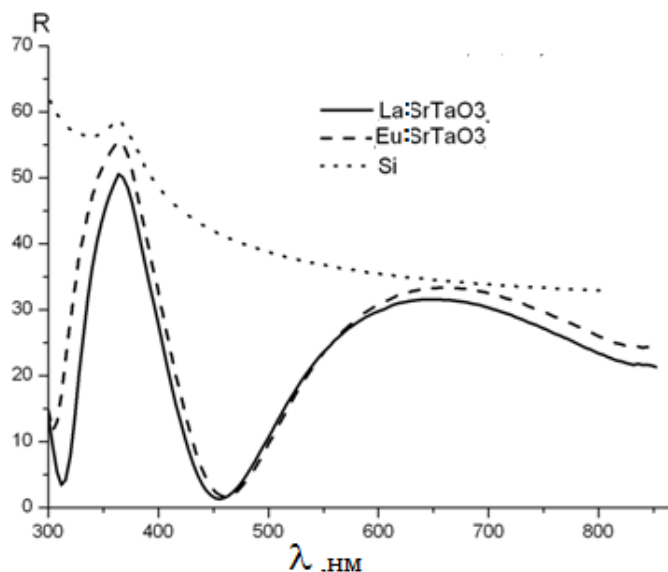


Рисунок 1 – Спектр отражения пленки SrTaO<sub>3</sub>, легированной La (сплошная кривая), легированной Eu (штриховая кривая) на Si подложке (точки)

$n_1 = 1.919$ ,  $k_1=0.009$ , толщина  $h = 173.07$  нм, тогда как для пленки Eu:SrTaO<sub>3</sub>  $n_1= 1.8775$ ,  $k_1=0.0026$ ,  $h = 178.57$  нм. Таким образом, пленка SrTaO<sub>3</sub>, легированная La, оказывается оптически более плотная, однако ее толщина меньше оптически менее плотной пленки SrTaO<sub>3</sub>, легированной Eu. Существенно, что поглощение в обеих пленках мало и не может объяснить отсутствие касания максимумов спектров отражения пленок с отражением от подложки. Причина этого - неоднородность пленки по ее толщине, которая приводит к зависимости показателя преломления пленки  $n(z)$  от координаты  $z$  по нормали к поверхности пленки. Проанализируем отражение от неоднородной пленки.

Если не учитывать рассеяние на неоднородностях пленки, то амплитудный коэффициент отражения  $r$  пленки на подложке

$$r = \frac{r_{01} + r_{12} e^{i2\varphi_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{i2\varphi_1}}, \quad (1)$$

определяется френелевскими коэффициентами отражения  $r_{01}$  и  $r_{12}$  от верхней (воздух–пленка) и нижней (пленка–подложка) границ пленки. При этом  $r_{01}$  и  $r_{12}$  вычисляются через значения показателя преломления неоднородной пленки на верхней  $n_a$  и нижней  $n_s$  границах соответственно. От профиля неоднородности зависит набег фазы  $\varphi_1$ , который удобно представить через усредненный по толщине показатель преломления пленки  $\tilde{n}$ :  $\varphi_1=4\pi(h/\lambda)\tilde{n}$ ,  $\lambda$  – длина волны. В отличие от предыдущих исследований, когда  $n(z)$  аппроксимировался линейной или квадратичной зависимостью от  $z$ , зададим его степенной зависимостью общего вида:  $n(z)=n_a(1+az^p)$ , где  $a$  – постоянная, значение которой в дальнейшем не играет роли. Полагаем, что  $\delta_a=\tilde{n}-n_a$ ,  $\delta_s=n_s-\tilde{n}$ , а из эллипсометрических измерений определяются толщина и  $\tilde{n}$  пленки, а ее привлечение позволяет существенно упростить решение обратной задачи спектрофотометрии.

Для этого использовался метод наименьших квадратов с целевой функцией, представляющей сумму квадратов разностей измеренных и рассчитанных величин коэффициента отражения  $R=|r|^2$ , где  $|r|$  – модуль амплитудного коэффициента  $r$  (1). Поиск минимума целевой функции проводился метода Гаусса-Ньютона, модифицированный Левенбергом и Марквард-

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

том. Дисперсия среднего показателя пленки задавалась формулой Сельмейера  $n^2=A+B \lambda^2/(\lambda^2-C^2)$ . Нахождению подлежали постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , а также  $\delta_a$ ,  $\delta_s$  и толщина пленки  $h$ . Полученные значения этих параметров приведены в таблице 1. Величины  $\delta_a$ ,  $\delta_s$  оказались равными и приведены в таблице как  $\delta$ . Расчитанные по этим параметрам спектры отражения хорошо коррелируют с экспериментально измеренными (рисунок 2). Оптическая неоднородность синтезированных пленок описывается линейной зависимостью показателя преломления от глубины  $z$  ( $p=1$ ). Обусловлена она неоднородностью распределения примеси по толщине пленки и при допировании La в три раза превышает неоднородность пленки, допированной Eu.

Аналогичные результаты были получены для пленок, сформированных на стекле.

Таблица 1

Параметры дисперсионной формулы, неоднородность и толщина пленок					
Пленка	A	B	C, мкм	$\delta$	$h$ , нм
La:SrTaO <sub>3</sub>	2.761	2.493	0.240	0.0379	171.8
Eu:SrTaO <sub>3</sub>	0.801	0.560	0.241	0.0120	183.9

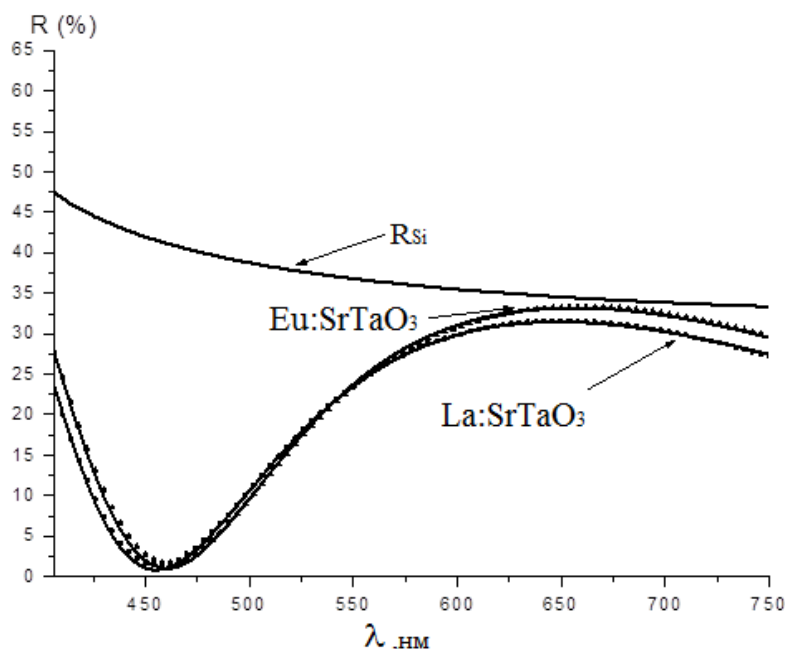


Рисунок 2 – Коэффициенты отражения пленок La:SrTaO<sub>3</sub>, Eu:SrTaO<sub>3</sub> на кремниевой подложке. Точки-эксперимент, сплошные кривые – расчет.

#### Список литературы

1. Dogan F. Focus on properties and applications of perovskites/ F. Dogan; H. Lin; M. Guilloux-Viry, Peña O., Sci. Technol. //Adv. Mater. – 2015. – Vol. 16. – P.020301.
2. Shin S. S. Exploring wide bandgap metal oxides for perovskite solar cells /S. S. Shin, S. J. Lee, and S. I. Seok //APL Mater. – 2019. – Vol. 7. 022401.
3. Bera A. Perovskite oxide SrTiO<sub>3</sub> as an efficient electron transporter for hybrid perovskite solar cells/ A. Bera, K. Wu, A. Sheikh [et al] // J. Phys. Chem. C – 2014. – Vol. 118. – P.28494–28501.
4. Weber M. J. Handbook of Optical Materials/ M. J. Weber – Boca Raton: FL, CRC Press: USA, 2003. (Section 1.3 Optical Properties. – 342 p.

УДК 661.961+546.62

Шепелевич В. Г.<sup>1</sup>, Гольцев М. В.<sup>2</sup>, Белая, О. Н.<sup>2</sup>, Чижикова, А. С.<sup>2</sup>, Шилько, В. М.<sup>1</sup>

## ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОДЫ С БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИМ СПЛАВОМ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО ЛОМА И ВИСМУТА

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования структуры быстрозатвердевших фольг сплава, изготовленного из алюминиевого лома (алюминиевая проволока, содержащая до 0,3 мас. % железа и кремния), легированного висмутом до 7,5 мас. %. Скорость охлаждения расплава порядка  $10^5 \dots 10^6$ . Взаимодействие фольг с водой сопровождается выделением водорода и образованием белого порошка, состоящего из выделений соединений  $Al_2O_3 \cdot 3(H_2O) + Al_2O_3 \cdot 5(H_2O)$ , и дисперсных частиц висмута.

Ограничение запасов органического топлива (угля, газа и др.) на Земле привело к поиску других эффективных источников энергии. К их числу относится водород, получаемый из воды, запасы которой огромны [1]. В работах [2-5] показана возможность получения водорода при взаимодействии сплавов алюминия, содержащих галлий, индий и олово, но запасы их руд ограничены в земной коре. Обнаружено, что сплавы алюминия с дисперсными выделениями висмута, полученные с применением быстрой кристаллизации со скоростью охлаждения  $10^2 - 10^4$  К/с, позволяют получать водород при взаимодействии с водой при высоких температурах и давлениях [6-9]. В последние десятилетия активно исследуются материалы, изготавливаемые сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы, свойства и структура которых существенно отличаются от аналогических параметров массивных образцов [10-11]. Фольги сплавов Al – (0,25 – 2,0) мас. % Bi, затвердевшие при скоростях охлаждения  $10^5 \dots 10^6$  К/с, взаимодействуют с водой, при нормальных условиях, выделяя водород [12].

Алюминий является распространенным элементом, но его получение связано с большим расходом электрической энергии, что определяет его высокую стоимость. Ее уменьшение может быть достигнуто использованием алюминиевого лома. Целью работы является исследование микроструктуры быстрозатвердевших фольг сплава, изготовленного из алюминиевого лома, содержащего железо и кремний (в дальнейшем Al (Fe, Si)), и висмута, и изучение возможности его применения для получения водорода при взаимодействии с водой.

Из алюминиевого лома и висмута чистой 99,999 сплавлением в тигле изготовлен сплав, содержащий Al (Fe, Si) – 7,5 мас. % Bi. Затем кусочек сплава ( $\approx 0,3$  г) расплавлялся и инжестировался на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра, где и происходило образование фольги. Для исследования использовались фольги толщиной 40...80 мкм. Скорость охлаждения расплава, как показал расчет, не менее  $10^5 \dots 10^6$  К/с [10]. Рентгеноструктурные исследования быстрозатвердевших фольг выполнены на дифрактометре Rigaku Ultimate 1V. Исследование морфологии внешней поверхности фольг, их поперечного сечения и распределения фаз осуществлено с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP. Исследования выполнялись при комнатной температуре и нормальном давлении, без использования щелочных добавок.

На дифрактограмме фольги Al (Fe, Si) наблюдались дифракционные отражения 200, 220, 311, 222, и др. Максимальным значением полюсной плотности характеризуется дифракционное отражение 222, что свидетельствует о формировании текстуры (111). Ее формирование обусловлено тем, что кристаллографические плоскости {111} являются наиболее плотноупакованными. Это и определяет преимущественный рост зерен, для которых плоскости {111} перпендикулярны направлению теплоотвода. Легирование алюминиевого лома Al (Fe, Si) висмутом подавляет текстуру (111).

Исследование поверхности быстрозатвердевших фольг с помощью растрового электронного микроскопа показало неоднородное распределение выделений висмута. Имеются области выделений висмута размером менее 0,3 мкм, прилегающие к поверхности кристал-

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

лизатора (рисунок 1а). На дне раковин наблюдаются более крупные выделения висмута. На свободной поверхности фольги *B* также возникает ячеистая структура (рисунок 1б). Границы ячеек содержат дисперсные выделения висмута.

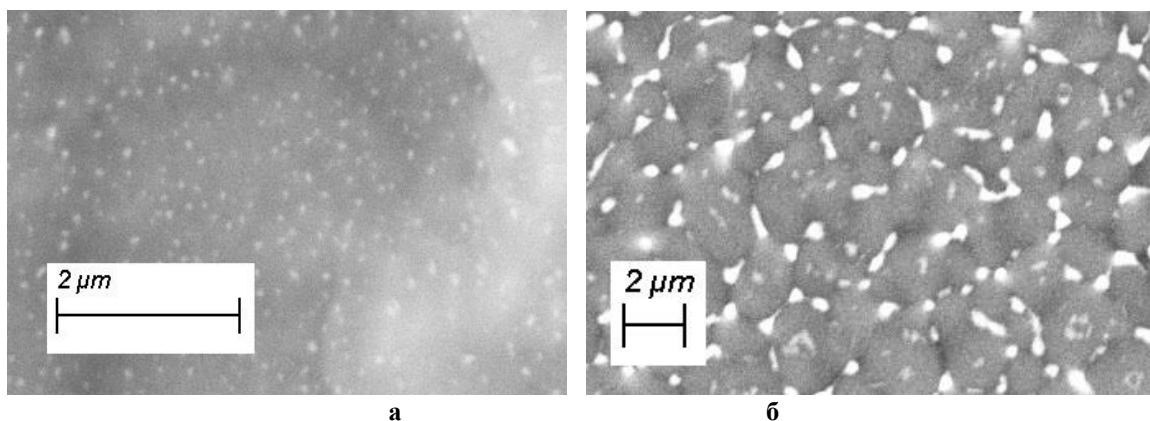


Рисунок 1 – Выделения висмута на поверхностях фольги *A* (а) и *B* (б)

Исследование поперечного сечения быстрозатвердевших с помощью растрового электронного микроскопа показало неоднородное распределение выделений висмута (рисунок 2). Слой фольги *A*, контактирующий с кристаллизатором, имеет сплошной серый фон, обусловленный дисперсностью частиц висмута. При большем увеличении выявлено, что дисперсные выделения висмута имеют шарообразную форму. Слой расплава, прилегающий к кристаллизатору, испытывает переохлаждение не менее 200 градусов [13], что способствует формированию дисперсных выделений висмута.

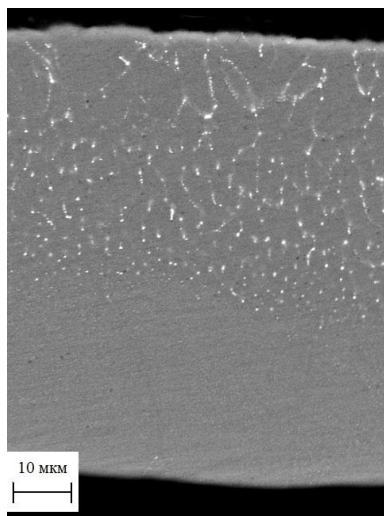


Рисунок 2 – Поперечное сечение фольги сплава Al(Fe, Si) - 7,5 мас. % Вi

При перемещении фронта кристаллизации от поверхности *A* к *B* объемная доля выделений висмута  $V_{\text{Вi}}$  и средняя хорда случайных секущих на выделениях висмута  $d$  увеличиваются, а удельная поверхность межфазной границы  $S$  уменьшается.

Формирование неоднородной структуры в быстрозатвердевших фольгах сплава Al (Fe, Si) – 7,5 мас. % Вi связано с особенностями диаграммы состояния системы Al – Вi. В ней имеет место расслоение жидкой фазы на две жидкости Ж<sub>1</sub> и Ж<sub>2</sub> при температурах выше 657°C. Поэтому при охлаждении расплава сначала происходит монотектическое превращение жидкости Ж<sub>1</sub>. При этом выделяется алюминий, которые захватывают атомы висмута, образуя пересыщенный твердый раствор висмута в алюминии. Затем он распадается с выделением дисперсных частиц висмута. Жидкость Ж<sub>2</sub>, богатая висмутом, при дальнейшем охлаждении испытывает эвтектическое превращение, при котором выделяется висмут и алюминий. В этом случае выделения висмута являются более крупными. Частицы висмута пре-



имущественно располагаются на границах ячеек алюминия. Быстрозатвердевшие фольги сплава Al (Fe, Si) – 7,5 мас. % Bi взаимодействуют с водой, и при этом происходит выделение водорода. Также происходит образование белого порошка. На его дифрактограмме наблюдаются дифракционные отражения соединений  $Al_2O_3 \cdot 5(H_2O)$  (100, 002, 102, 112, 104, 105, 213) и  $Al_2O_3 \cdot 3(H_2O)$  (021, 022, 203, 114). Выделение водорода и образование вышеуказанных соединений подтверждается возможностью протекания соответствующих реакций:  $2Al + 6H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 3(H_2O) + 3H_2$  и  $2Al + 8H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot 5(H_2O) + 3H_2$ .

Таким образом, при взаимодействии быстрозатвердевших фольг сплава Al (Fe, Si) – 7,5 мас. % Bi, содержащего дисперсные выделения висмута, с водой при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении происходит выделение водорода. При этом для получения фольг использовалась высокоскоростная кристаллизация, относящаяся к ресурсо- и энергосберегающим технологиям, а также вместо чистого алюминия – алюминиевый лом (алюминиевая трубка), что способствует понижению стоимости полученного водорода и расширению возможностей применения в различных областях деятельности человека.

#### Список литературы

1. Козин Л. Ф., Волков С. В. Водородная энергетика и экология. Киев. Наукова Думка. 2020. 396 с.
2. Школьников Е. И., Атманюк И. Н., Долженко А. В., Якилкин И. В. Способ активации алюминия для получения водорода. Патент RU 2606449.
3. Мунтян С. П., Володина Г. Ф., Грабко Д. З., Житарь В. Ф. Алюминиевый сплав для генерирования водорода из воды // Электронная обработка материалов. 2009. №4. С. 108-112.
4. Woodall M. J., Jeffrey T. Z., Charles R. A. Power Generation from Solid Aluminium. Patent US 20080063597.
5. Ziebarth J.T., Woodall M. J., Kramer R.A. Liquid Phase-enabled Reaction of Al-Ga and Al-In-Sn Alloys with Water // Int. J. of Hydrogen Energy. 2011. 36(9). P. 5271-5279.
6. Кошкин К. Н., Семенов В. В., Серопян Г. В., Урусов К. Х. Способ получения водорода. Патент RU 2356830C2.
7. Козин Л. Ф., Волков С. В., Гончаренко С. Г., Ткач С. В., Данильцев Б. И. Кинетика и механизм коррозионного растворения в воде активированного висмутом алюминия растрескования алюминия // Украинский химический журнал. 2009. Т.75. № 11. С. 3-11.
8. Козин Л. Ф., Волков С. В., Гончаренко С. Г., Ткач С. В., Данильцев Б. И. Кинетика и механизм взаимодействия с водой алюминия и магния тройной системы Al-Mg-Bi // Физико-химия поверхности и защита материалов. 2011. Т.47, №2. С. 144-153.
9. Кудряшева О. Б. Определение оптимальных параметров реакций получения водорода на основе окисления нанопорошка алюминия // Южно-Сибирский научный журнал. 2017. №4(20). С. 43-47.
10. Шепелевич В. Г., Гусакова О. В., Гусакова С. В. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг тройного сплава Bi-In-Sn и спаенного соединения на его основе // Физика и химия обработки материалов. 2022. № 2. С. 65-70.
11. Ташлыкова-Бушкевич И. И., Яковенко Ю. С., Шепелевич В. Г., Ташлыков И. И. Влияние состава микрорельефа на смачивающие свойства поверхности фольг сплава Al-In, полученных высокоскоростной кристаллизацией // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 3. Стр. 65-72.
12. Шепелевич В. Г. Структура быстрозатвердевших сплавов Al – (0,25 – 2,0) мас. % Bi // Физика и химия обработки материалов. 2022. № 4. С. 32-36.
13. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. М.: Металлургия, 1982. – 168 с.

**МОДИФИКАЦИЯ ФЕРРОСУЛЬФАТНОГО ДОЗИМЕТРА**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе предложен вариант модификации дозиметра Фрике – одного из наиболее распространенных в практике дозиметрии устройств для исследования радиационных эффектов в материалах. Проанализированы возможности модификации на основе используемых в автомобильной промышленности методов контроля содержания кислорода в выхлопных газах. Показана возможность повышения в несколько раз точности определения дозы облучения, полученную человеком при работе с ионизирующим излучением.

Химические дозиметры – эти приборы, широко применяющиеся для определения мощности дозы излучения источников, которые используются для исследования радиационных эффектов в материалах, в особенности тогда, когда нет необходимости знать энергетический спектр. Использование этих дозиметров основано на образовании химически активных продуктов под действием излучения. Эти продукты подвергаются химическим превращениям по хорошо известным реакциям, а образующиеся соединения могут быть легко определены. Количество образовавшихся активных продуктов пропорционально полной поглощенной дозе излучения. Наиболее распространенным химическим дозиметром является водный раствор сульфата двухвалентного железа (дозиметр Фрике).

Ферросульфатный дозиметр – измерительный прибор, который применяется для измерения больших доз ионизирующего излучения, чаще всего для изучения свойств материалов до и после облучения. Работает данный прибор на окислении ионов двухвалентного железа продуктами радиолиза воды, например,  $H + OH \rightarrow H_2O$ ,  $H_2 + OH \rightarrow H + H_2O$ ,  $H_2O_2 + e_{гидр} \rightarrow OH^- + OH$ , в кислом водном растворе, и в последствии измерении концентрации образовавшихся ионов трёхвалентного железа, которая в широком диапазоне (0,5 – 2000 Гр) пропорциональна поглощённой дозе. Измерения поглощённой дозы дают результаты близкие к поглощённой дозе для биологических тканей. Такая согласованность объясняется тем, что в качестве рабочего вещества применяется водный раствор [1].

Таким образом, ферросульфатный дозиметр имеет сильную сторону в виде практически полной тканезквивалентности, и слабую – в виде нижнего порога поглощённой дозы для пропорциональности результатов, что делает невозможным его применение для измерения величины поглощенной дозы ниже 0,5 Гр, что очень много для использования в качестве мониторинга радиационной обстановки, кроме случаев чрезвычайных ситуаций. В таблице 1 приведены различные дозы облучения на человеческий организм и их последствия.

Таблица 1

Дозы и их влияние на организм

Доза, Гр	Причина и результат воздействия
$(0,7 - 2) \cdot 10^{-3}$	Доза от естественных источников в год
0,05	Предельно допустимая доза профессионального облучения в год
0,1	Уровень удвоения вероятности генных мутаций
0,25	Однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах
1,0	Доза возникновения острой лучевой болезни
3 - 5	Без лечения 50% облученных умирает в течение 1-2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга
10 - 50	Смерть наступает через 1-2 недели вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта
100	Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Из таблицы 1 следует, что до значения 0,5 Гр есть достаточно пунктов, которые требуется отслеживать и важно, чтобы такие дозы считались максимально точно, передавая дозу, которую мог получить человек. Это необходимо по причине разной реакции различных тканей организма.

Для максимально точного результата можно использовать биологические методы дозиметрии, но их минус заключается в медленной обработке данных при массовом облучении и необходимости иметь данные о человеке до облучения.

Во многом ограничения по нижнему порогу чувствительности ферросульфатного дозиметра обусловлены способом исследования его образцов после облучения, а именно – спектрофотометром.

Измерение концентрации ионов  $Fe^{3+}$  после облучения кюветы производится на спектрофотометре, обычно на длине волны  $\lambda = 304$  нм. Определив оптическую плотность  $D = \ln(I/I_0)$  раствора относительно необлучённого дозиметра и зная длину оптического пути  $l$ , можно вычислить молярную концентрацию ионов  $Fe^{3+}$  в растворе, равную  $M = \frac{D}{l\mu(Fe^{3+})}$  где  $\mu(Fe^{3+}) = 2095 \frac{л}{\text{моль}\cdot\text{см}}$  — молярный коэффициент ослабления пучка света от ионов трехвалентного железа на длине волны 304 нм. Далее поглощённая доза в ферросульфатном дозиметре, для известных значений плотности раствора  $\rho$  (кг/л) и молярной концентрации действующего вещества  $M$  (моль/л), вычисляется по формуле  $D_{\text{полг}} (\text{Гр}) = 9,65 \cdot 10^6 M / (Gr)$ , где коэффициент  $G$  – так называемый радиационно-химический выход, то есть среднее количество прореагировавших молекул (атомов, ионов) действующего вещества на 100 эВ поглощённой энергии ионизирующего излучения в растворе [2]. Следовательно, расчет идет исходя из оптической плотности раствора, что и обуславливает высокий порог работы дозиметра. Для снижения минимального порога дозы требуется использовать другие методы измерения раствора.

В поисках альтернативных способов анализа результатов было решено обратиться к автомобилестроению. С учётом современных экологических норм для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания становится понятно, что их системы газоанализа точны и при этом относительно бюджетные. Вывод о точности лямбда зондов можно сделать исходя из значений выбросов, установленных в последнем экологическом стандарте евро-6 для бензиновых и дизельных двигателей внутреннего сгорания (таблицы 2 и 3) и норм по содержанию веществ для топлива [3].

Таблица 2

Норма содержания веществ для дизельных двигателей

Экологический стандарт	Оксид углерода(CO), г/км	Оксид азота(NOx), г/км	HC+NOx, г/км	Взвешенные частицы, г/км
Евро-1	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Евро-2	1,00	-	0,7	0,08
Евро-3	0,64	0,50	0,56	0,05
Евро-4	0,50	0,25	0,3	0,025
Евро-5	0,50	0,18	0,23	0,005
Евро-6	0,50	0,08	0,17	0,005

Для соблюдения высоких требований Евро-3, Евро-4, Евро-5 и Евро-6 к выбросам вредных веществ в выхлопных газах автомобилей в ЕС поэтапно вводились и более строгие нормы к качеству автомобильного топлива, которые установлены в европейском стандарте EN 590 «Автомобильные топлива. Дизельное топливо. Требования и методы испытаний» и в европейском стандарте EN 228 «Автомобильные топлива. Неэтилированный бензин. Требования и методы испытаний», а именно [4]:

- для дизельного топлива цетановое число должно быть не менее 51 (с 2000 года), содержание серы — не более 350 ppm (с 2000 года), 50 ppm (с 2005 года) и 10 ppm (с 2009 года), полициклических ароматических углеводородов — не более 8 % масс. (с 2009 года);

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

- для автомобильного бензина содержание серы — не более 150 ppm (с 2000 года), 50 ppm (с 2005 года) и 10 ppm (с 2009 года), бензола — не более 1 % об. (с 2000 года), ароматических углеводородов — не более 42 % об. (с 2000 года) и 35 % об. (с 2005 года), олефиновых углеводородов — не более 18 % об. (с 2000 года).

Таблица 3

Норма содержания веществ для бензиновых двигателей

Экологический стандарт	Оксид углерода(II) (CO), г/км	СН соед., г/км	Летучая органика, г/км	Оксид азота(NOx), г/км	HC+NOx, г/км	Взвешенные частицы, г/км
Евро-1	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	-
Евро-2	2,2	-	-	-	0,50	-
Евро-3	2,3	0,2	-	0,15	-	-
Евро-4	1,0	0,1	-	0,08	-	-
Евро-5	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,005
Евро-6	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,005
Евро-6D temp	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,0045

Исходя из анализа данных из приведенных выше стандартов, можно сделать вывод, что современные системы газоанализа в автомобилестроении должны улавливать значения меньше, чем содержание контролируемых веществ в исходном топливе, а это меньше 10 ppm. Целесообразно внедрить систему с подобными датчиками в ферросульфатные дозиметры, адаптировать их для определения трехвалентного железа и проверять раствор не в жидкой фазе, а в газообразной. Это позволит улавливать и определять число отдельных молекул Fe<sup>3+</sup>, что поможет снизить порог определения дозы облучения в несколько раз, и приведет к возможности использования данных дозиметров не только в технике и материаловедении, но и для определения дозы, получаемой человеком. А с учётом такого свойства дозиметра Фрикке, как тканеэквивалентность, данные показания будут гораздо более приближенными к реальной дозе, получаемой человеком, нежели значения, полученные другими способами дозиметрии.

#### Список литературы

1. Справочник химика 21 / Химия и химическая технология [Электронный ресурс] / World Health Organization. – Электрон. дан. и прогр.: Швейцария, 2013. – Режим доступа к ресурсу: <https://chem21.info/> (дата обращения: 20.03.2023).
2. Химическая энциклопедия: В 5 т.: т.2: Даффа-Меди/Редкол.: Кнунянц И. Л. (гл. ред.) и др. – М.: Сов. энцикл., 1990. – 671 с.: ил.
3. Федеральный портал спецтехники и коммерческого транспорта [Электронный ресурс] / World Health Organization. – Электрон. дан. и прогр.: Швейцария, 2013. – Режим доступа к ресурсу: <https://perevozka24.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).
4. Портал о нефти и химии Беларуси «Нефтехимия» [Электронный ресурс] / World Health Organization. – Электрон. дан. и прогр.: Швейцария, 2013. – Режим доступа к ресурсу: <https://belchemoil.by> (дата обращения: 20.03.2023).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ NORMALY-OFF НЕМТ-ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/AlN/GaN

Институт физики им. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Представлены результаты моделирования нормально-закрытого режима работы НЕМТ-транзистора на основе гетероструктур AlGaN/AlN/GaN с толщиной слоя AlN 1 нм. Для достижения нормально-закрытого состояния используется метод формирования слоя p-GaN толщиной 40 нм под затвором. Расчеты показывают, что нормально-закрытое состояние достигается при использовании относительно тонких слоев AlGaN с невысоким содержанием Al. Нормально-закрытое состояние транзистора было получено для следующих параметров моделируемой структуры: 15% Al – AlGaN 18 нм, 18% Al – AlGaN 14 нм, 20% Al – AlGaN 12 нм, 22% Al – AlGaN 11 нм, 25% Al – AlGaN 10 нм.

**Введение.** Сегодня кремний является основным материалом для создания полупроводниковых приборов. В настоящее время около 87% рынка устройств силовой электроники основано на кремниевой технологии [1]. Однако эффективность устройств на основе кремния уже практически подошла к своему физическому пределу [2]. В этой связи большие усилия были направлены на поиск и исследования альтернативных полупроводниковых материалов. Устройства силовой электроники следующего поколения должны иметь высокое отношение токов включения/выключения, высокое напряжение пробоя, высокую скорость переключения, отличные рабочие характеристики при высоких температурах, низкое сопротивление во включенном состоянии, низкие токи утечки. Одним из наиболее привлекательных материалов для создания силовых устройств, удовлетворяющих вышеперечисленным характеристикам, является нитрид галлия (GaN) [1, 3, 4]. GaN обладает широкой запрещенной зоной ( $E_g \approx 3.4$  эВ), что обеспечивает высокие значения напряженности критического поля, т.е. высокое напряжение пробоя. Достаточно большое значение ширины запрещенной зоны позволяет также увеличить максимальную температуру работы устройств на основе GaN и снизить токи утечки [4].

Структура GaN-транзистора, используемая для создания силовых устройств, представляет собой транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), которые имеют проводящий канал с двумерным электронным газом на гетерогранице между AlGaN(AlN)/GaN. Концентрация двумерного электронного газа достигает значений  $\sim 10^{13}$  см<sup>-2</sup>, а подвижность электронов в двумерном газе составляет 1500 – 2000 см<sup>2</sup>/В·с [1, 3]. Поскольку канал исток/сток является проводящим, устройство GaN-HEMT считается нормально-открытым, так как для протекания тока исток/сток не требуется напряжение на затворе. Для применения в силовых устройствах необходимо реализовать нормально-закрытый режим работы транзистора, в котором канал не проводит ток при нулевом напряжении на затворе. Одним из методов реализации нормально-закрытого состояния HEMT-транзистора является создание слоя p-типа проводимости под затвором, который истощает канал в области под затвором, тем самым нарушает проводящее состояние последнего [3, 4]. В нашей работе мы приводим результаты моделирования нормально-закрытых транзисторных гетероструктур AlGaN/AlN/GaN посредством формирования слоя p-GaN в области под затвором.

**Моделирование нормально-закрытого режима транзистора AlGaN/AlN/GaN.** Для моделирования была выбрана следующая транзисторная структура. Барьерный слой Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N ограничен снизу дополнительным барьерным слоем AlN толщиной 1 нм. Слой AlN уменьшает рассеяние электронов на границе AlGaN/GaN и способствует увеличению концентрации двумерного электронного газа [6]. На границе AlN/GaN формируется канал с двумерным электронным газом. Слой p-GaN толщиной 40 нм с концентрацией акцепторов  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> формировался в области под электродом затвора на AlGaN. Моделируемая транзисторная гетероструктура представлена на рисунке 1.

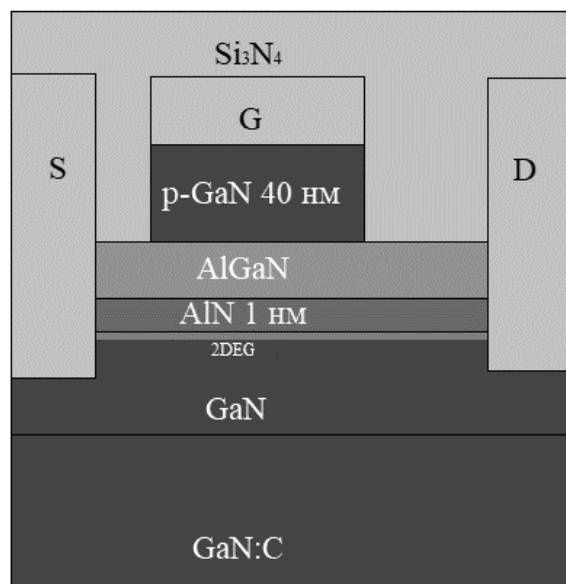


Рисунок 1 – Моделируемая транзисторная гетероструктура. S, D и G обозначают соответственно контакты истока, стока и затвора.

Основная цель моделирования – определить параметры структуры, обеспечивающие закрытое состояние транзистора. Для этой цели при моделировании задавались слои  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  с различным содержанием Al и определялось изменение концентрации двумерного электронного газа в канале. Также рассчитывался ток исток/сток в зависимости от напряжения стока при нулевом напряжении на затворе при развертке напряжения стока от 0 до 25 В. Транзистор считался нормально-закрытым, если значение тока стока не превышало  $\sim 10^{-6}$  А/мм. Расчеты показали, что основным параметром, определяющим нормально закрытое состояние рассматриваемого транзистора (рис. 1), является толщина слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , которая не должна превышать некоторого предельного значения, отличающегося для различных значений  $x$ . Для высокого содержания Al ( $x > 0.25$ ) мы не получили нормально-закрытого состояния рассматриваемой транзисторной структуры. Помимо этого, при толщине AlGaN более 20 нм транзистор является нормально-открытым даже для низкого состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x < 0.15$ ). Полученные значения максимальной толщины  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , при которой транзистор является нормально-закрытым, для некоторых значений  $x$  представлены на рисунке 2.

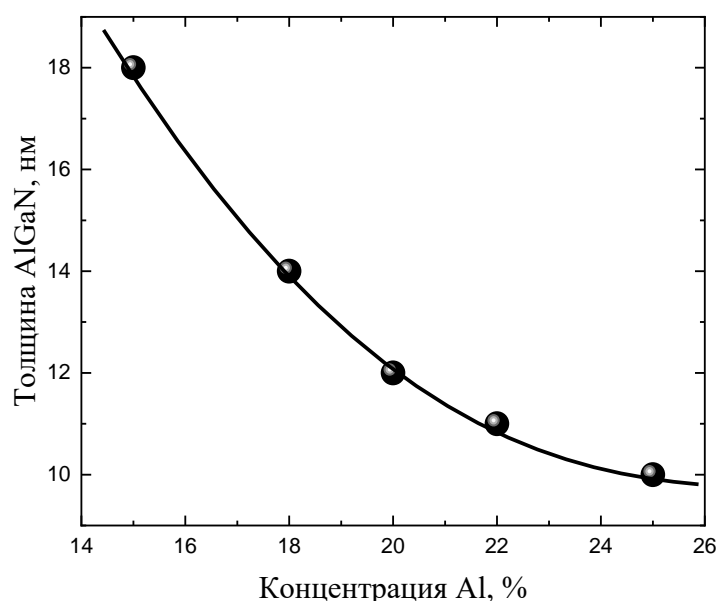


Рисунок 2 – Полученные в результате моделирования значения максимальной толщины слоя AlGaN, при которой транзистор остается в нормально-закрытом состоянии, в зависимости от содержания Al.

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Для 15% Al нормально-закрытое состояние транзистора достигается при толщине AlGa<sub>x</sub>N, не превышающей 18 нм, для 18, 20, 22 и 25% Al максимальная толщина слоя AlGa<sub>x</sub>N составляет, соответственно, 14, 12, 11 и 10 нм. В целом расчеты показывают, что добиться нормально-закрытого состояния транзисторной структуры AlGa<sub>x</sub>N/AlN/GaN с толщиной AlN 1 нм можно, используя относительно тонкие слои Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N с невысоким содержанием Al. Чем выше концентрация Al, тем тоньше должен быть слой AlGa<sub>x</sub>N для достижения нормально-закрытого режима работы транзистора. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других теоретических и экспериментальных работ [4, 6].

#### Список литературы

1. Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices / F. Roccaforte, P. Fiorenza, G. Greco, R. Lo Nigro, F. Giannazo, F. Lucolano, M. Saggio // *Microelectronic Engineering*. – 2018. – V. 187-188. – P. 66 – 77.
2. Materials and processing issue in vertical GaN power electronics / J. Hu, Y. Zhang, M. Sun, D. Piedra, N. Chowdhury, T. Palacios // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2018. – V.78. – P. 75 – 84.
3. Normally-OFF GaN HEMT for high power and high-frequency applications / A. Z. Musa, M. Mohamad Isa, N. Ahmad, S. Taking, F.A. Musa // *AIP Conf. Proc.* – 2021. – V. 2347. – P. 020121(8).
4. Нормально закрытый транзистор с затвором р-типа на основе гетероструктур AlGa<sub>x</sub>N/GaN / В. И. Егоркин, В. А. Беспалов, А. А. Зайцев, В. Е. Земляков, В. В. Капаев, О. Б. Кухтяева // *Известия вузов. Электроника*. – 2020. – Т. 25. – №5. – С. 391 – 401.
5. A comprehensive analysis of AlN spacer and AlGa<sub>x</sub>N n-doping effects on the 2DEG resistance in AlGa<sub>x</sub>N/AlN/GaN heterostructures / C. Piotrowicz, B. Mohamad, B. Rustemi, N. Malbert, M.A. Jaud, W. Vandendaele, M. Charles, R. Gwoziecki // *Solid State Elec.* – 2022. – V. 194. – P. 108322(4).
6. Recessed-gate structure approach toward normally-off high-voltage AlGa<sub>x</sub>N/GaN HEMT for power electronics applications / W. Saito, Yo. Takada, M. Kuraguchi, K. Tsuda, I. Omura // *IEEE Trans. Elec. Devices*. – 2006. – V. 53. - №. 2. – P. 356 – 362.

УДК 621.315.592; 539.12.04

Ювченко В. Н., Комаров А. Ф., Мискевич С. А., Ермолаев А. П.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белгосуниверситета, Минск, Беларусь.

Проведены расчеты пространственно-временной эволюции концентрации носителей заряда для начальных стадий ( до  $10^{-12}$  с) формирования трека высокоэнергетического иона в кремниевых структурах, облучаемых ионами Fe, Kr и Xe с энергиями 16–547 МэВ. Получены аналитические приближения рассчитанных зависимостей концентрации электронов и дырок от времени и расстояния до центра трека иона. Проведена оценка влияния эффекта скорости иона на пространственное распространение избыточных носителей заряда.

Актуальной задачей при производстве интегральных микросхем и дискретных силовых МОП-транзисторов, используемых в космических аппаратах, является повышение их радиационной стойкости к одиночным случайным эффектам (ОСЭ) как непосредственно от тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), входящих в состав космических лучей, так и от вторичных ионов, создаваемых в результате ядерных столкновений высокоэнергетических протонов с ядрами вещества. Энергии, выделенной такой частицей в приборной структуре, достаточно, чтобы произвести на очень короткое время сверхвысокоплотную электронную-дырочную плазму вдоль траектории иона, наличие которой может вызывать ОСЭ. Основными из них в силовых МОП-транзисторах являются пробой подзатворного диэлектрика (Single-Event Gate Rupture - SEGR) и вторичный пробой, связанный с открытием паразитного биполярного транзистора (Single-Event Burnout - SEB). Также нежелательным последствием взаимодействия с ТЗЧ являются сбои в КМОП-ячейках памяти (Single-Event Upset – SEU).

В процессе создания радиационностойких электронных компонентов, используемых в космических аппаратах, неотъемлемым этапом являются лабораторные испытания экспериментальных образцов и готовой продукции при моделировании соответствующих условий космического пространства. В частности, испытания на стойкость к ОСЭ проводятся на ускорителях тяжелых ионов. При этом масса и энергия ионов выбираются так, чтобы линейные потери энергии иона (ЛПЭ) соответствовали заданным заказчиком пороговым линейным потерям энергии по одиночным радиационным эффектам отказов.

Модели ОСЭ, используемые в ПО приборно-технологического проектирования, (например, Atlas и Victory Device фирмы Silvasco и Sentaurs Device фирмы Synopsys), также используют величину ЛПЭ в качестве основного параметра, характеризующего как налетающую частицу, так и материал чувствительного объема прибора. Однако анализ экспериментальных данных показывает, что для ионов с одинаковой ЛПЭ, но разной скоростью наблюдаются разные накопленные заряды и сечения ОСЭ [1, 2].

Для расчета пространственно-временной эволюции концентраций возбужденных электронов, валентных дырок и дырок на глубоких атомных уровнях в кристаллическом кремнии, создаваемых в области трека высокоэнергетического иона, использован программный комплекс TREKIS-3 [3, 4], позволяющий моделировать пролет одиночного иона в невозмущенном материале методом Монте-Карло. Модель учитывает первичную ионизацию материала налетающей ТЗЧ; пространственное распределение создаваемых быстрых электронов и кинетику вызываемых ими ионизационных каскадов; релаксацию дырок на глубоких атомных оболочках, созданных ионизацией, включая межатомные Оже-процессы и радиационные распады.

При проведении расчетов учет коллективной реакции электронной подсистемы мишени на вносимое возбуждение проводился с использованием формализма комплексной ди-



#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

электрической функции. Эффективные массы электронов и валентных дырок рассчитывались из плотности состояний. Эффективный заряд налетающего иона рассчитывался по формуле Баркаса. Количество итераций при моделировании составляло 1000; толщина слоя кристаллического кремния 10 нм; время – до 1000 фс после пролета иона.

Проведены расчеты кинетики носителей заряда для начальных стадий формирования трека иона в кристаллическом Si, облучаемом ионами Fe с энергией 16 и 435 МэВ (ЛПЭ 20,3 МэВ·см<sup>2</sup>/мг), Kr с энергией 257 МэВ (ЛПЭ 40,6 МэВ·см<sup>2</sup>/мг) и Xe с энергией 547 МэВ (ЛПЭ 69,1 МэВ·см<sup>2</sup>/мг). Были получены:

- зависимости плотности возбужденных электронов и валентных дырок от радиального расстояния до центра трека иона;
- зависимость плотности энергии в электронной подсистеме от радиального расстояния до центра трека иона;
- временная эволюция распределения переданной ионом энергии по подсистемам материала: электронная, атомная, валентные дырки, дырки во внутренних (L- и K- ) оболочках кремния.

Максимальная концентрация возбужденных электронов в трековой области получена для случая облучения Xe и составляет  $1,6 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$  в момент времени 0,32 фс на расстоянии 3 Å от траектории иона. При этом происходит полная ионизация внешних электронных оболочек атомов Si в цилиндрической области радиусом от 3 Å (облучение ионами Fe) до 5 Å (облучение ионами Xe,  $E = 547 \text{ МэВ}$ ). Следует отметить, что к моменту времени 100 фс большая часть энергии, переданной налетающим ионом материалу мишени, локализуется в подсистеме валентных дырок (73% для всех рассматриваемых ионов). К моменту времени ~300 фс заканчиваются все процессы вторичной ионизации и Оже-распада вакансий на внутренних оболочках атомов Si, и общее количество возбужденных электронов в трековой области остается практически постоянным. В дальнейшем распределение электронов расплывается по  $r$  практически без изменения формы. К моменту времени 1000 фс избыточная концентрация электронов в центральной области трека снижается до  $1,46 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и  $4,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для ионов Xe,  $E = 547 \text{ МэВ}$  и Fe,  $E = 16 \text{ МэВ}$ , соответственно. При этом максимальная концентрация валентных дырок в центре трека спадает намного медленнее и при  $t=1000 \text{ фс}$  составляет  $1,46 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и  $5,9 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  для ионов Xe,  $E = 547 \text{ МэВ}$  и Fe,  $E = 16 \text{ МэВ}$ , соответственно. На рисунке 1 представлены распределения электронов и дырок, рассчитанные для кремния, облучаемого ионами Fe с одинаковыми ЛПЭ, но различными энергиями: 16 и 435 МэВ.

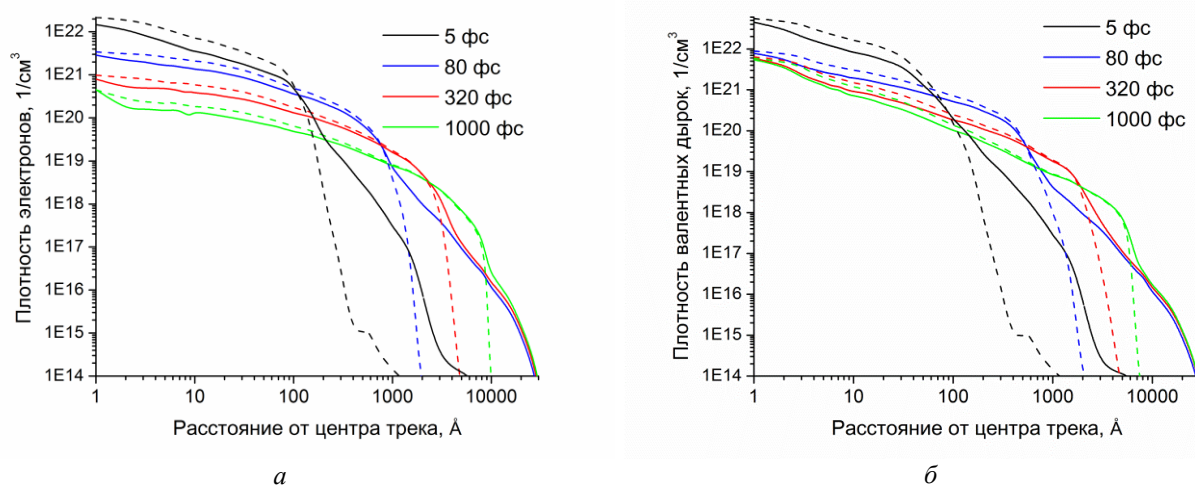


Рисунок 1 – Рассчитанная зависимость плотности возбужденных электронов (а) и плотности валентных дырок (б) от радиального расстояния до траектории иона Fe для различных моментов времени после пролета иона. Сплошные линии – энергия иона Fe равна 435 МэВ; пунктирные – 16 МэВ.

Получены аналитические приближения рассчитанных зависимостей плотности возбужденных электронов и дырок от расстояния и времени  $N_{e,h}(r, t)$ . Использовался подход, аналогичный представленному в [5] для аппроксимации плотности энергии, выделенной ионом в электронную подсистему мишени. При этом отметим, что рассчитанные распределения плотности носителей заряда имеют «тяжелые» хвосты в области больших  $r$ , наиболее выраженные для случаев облучения ионами с большими энергиями. Аппроксимируем их распределением Вейбулла с  $k = 2$ :

$$N_e(r, t) = Ar^k \frac{\left(1 - \frac{r + \theta}{R + \theta}\right)^{1/\alpha}}{r + \theta} (1 + K) + Br \exp\left(-\left(\frac{r}{\lambda}\right)^2\right), \quad (1)$$

где  $K = a \left(\frac{r-b}{d} \exp\left(\frac{b-r}{d}\right)\right)$ ,  $\lambda = R / \ln(2)^{1/2}$ ,  $d = d(t)$ ,  $R = R(t)$ ,  $A = A(t)$ ,  $B = B(t)$ .

Для иона Fe с энергией 16 МэВ в Si получены следующие значения коэффициентов в формуле (1):

$$\theta = b = 1 \text{ \AA}; k = 0,42; a = 1,5; \alpha = 1,079,$$

$$d(t) = 89 - 72 \exp(-t / 4,86 \cdot 10^{-13}), \quad R(t) = 5,82 \cdot 10^3 - 5,73 \cdot 10^3 \exp(-t / 1,34 \cdot 10^{-12}),$$

$$A(t) = 1,1 \cdot 10^{21} + 3,34 \cdot 10^{22} \exp(-t / 4,76 \cdot 10^{-14}), \quad B(t) = 5,75 \cdot 10^{15} + 1,57 \cdot 10^{19} \exp(-t / 2,04 \cdot 10^{-14}).$$

Для иона Fe с энергией 435 МэВ в Si лучшую аппроксимацию рассчитанных распределений дает использование значений:  $\alpha = 1,667$ ,  $A(t) = 9,0 \cdot 10^{20} + 2,7 \cdot 10^{22} \exp(-t / 4,76 \cdot 10^{-14})$ ,  $\lambda = \text{const} = 3100 / \ln(2)^{1/2}$ .

Отметим, что стандартная функция генерации электронно-дырочных пар в треке ТЗЧ, представленная в пакетах приборно-технологического проектирования, имеет вид

$$G(r, l, t) = L(l) \cdot R(r) \cdot T(t), \quad (2)$$

где  $R(r)$  можно представить в виде  $R(r) = \exp(-r / r_0)$ . При ее использовании в моделировании изменений электрических характеристик микроэлектронных приборов под воздействием ТЗЧ наилучшим приближением результатов наших расчетов в интервале  $t = 300\text{--}1000$  фс будет использование значений  $r_0 = 40$  нм для ионов Fe с энергией 16 МэВ и  $r_0 = 100$  нм для ионов Fe с энергией 435 МэВ.

#### Список литературы

1. Monte-Carlo simulations of ion track in silicon and influence of its spatial distribution on single event effects / T. Colladant [et al] // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B.– 2006.– Vol. 245, № 2.– P. 464–474.
2. Hansen, D. L. A track-structure based approach to upset-rate calculations using the Katz model / D. L. Hansen // IEEE Trans. Nucl. Sci.– 2021.– Vol. 68, No. 8.– P. 1633–1641.
3. Medvedev, N. A. Time-resolved electron kinetics in swift heavy ion irradiated solids / N.A. Medvedev, R.A. Rymzhanov, A.E. Volkov // J. Phys. D. Appl. Phys.– 2015.– Vol. 48.– P. 355303(1–24).
4. Rymzhanov, R. A. Effects of model approximations for electron, hole, and photon transport in swift heavy ion tracks / R.A. Rymzhanov, N.A. Medvedev, A.E. Volkov // Nucl. Instrum. Methods B.– 2016.– Vol. 388.– P. 41–52.
5. Waligorski, M. P. R. The radial distribution of dose around the path of a heavy ion in liquid water / M. P. R Waligorski, R. N. Hamm, R. Katz // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part D.– 1986.– Vol. 11.– P. 309–319.

## МАСШТАБИРУЕМЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДАЛЬНОГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

<sup>1</sup>Институт материаловедения АН, Республики Узбекистан, г. Ташкент

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, г.Минск

Методами электронной микроскопии, рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии рентгенофазового анализа установлены микроструктура и состав фаз нанокерамической керамики в системе оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CuO}$ , полученной модифицированным методом керамической технологии.

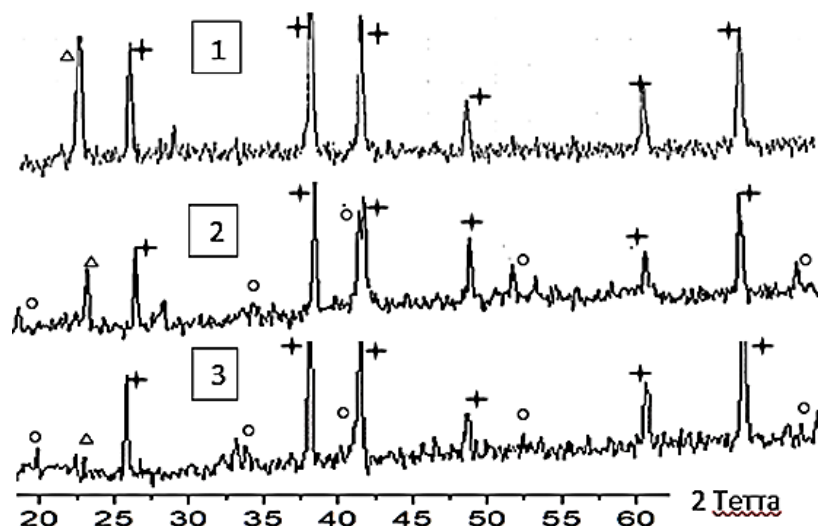
Получение и исследование нанокерамических материалов является важным этапом в создании техники нового поколения. Так в последнее время была разработана специальная керамика для создания нового типа инфракрасного излучения - импульсного излучения дальнего ИК-диапазона. Как оказалось, устройства на основе этого материала имеют широкое прикладное значение с точки зрения эффективного применения для медицины, машиностроения, для низкотемпературной стерилизации и сушки, в том числе продукции сельского хозяйства без разрушения их полезных свойств [1]. Одной из главных особенностей применения таких устройств является их энергосберегающий эффект. Однако, для получения этой керамики в настоящее время используется маломасштабная гелиотехнология. Модулированное, импульсное ИК излучение дальнего диапазона, создается за счёт имеющейся микроструктурной гетерогенности на наноуровне, которая возникает при температурах приблизительно около 3000 градусов при последующей быстрой закалке материала [2]. Данная керамика в своей основе имеет перовскитоподобную кристаллографическую структуру на основе хромитов, алюминатов, цирконатов редкоземельных и других металлов с широким спектром добавок, определяющих те или иные её функциональные свойства. В этом случае основой создания уникального ИК излучения являются межфазные границы аморфных или метастабильных наночастиц керамики с основными фазами композита.

Вместе с тем дальнейшее развитие данной отрасли требует увеличения объема производства, что невозможно в рамках существующей технологии. В настоящей работе разрабатываются пути масштабирования процесса синтеза нанокерамических композитов за счет применения новых модифицированных методов керамической технологии, которые развиваются авторами работы [3]. Так предлагается проводить синтез в условиях термомеханического воздействия (ТМВ) на порошкообразный материал. В этом случае взаимодействие, протекает при комплексном воздействии тепловых и механических факторов, что обеспечивает одновременное сочетание диффузионного и дислокационного механизмов переноса вещества. Тогда за счёт увеличения избыточной свободной энергии в процессе локального роста температуры и давления системы в момент столкновения мельющих тел образуются, в том числе, неравновесные фазы. Область их температурной стабильности в обычных условиях не совпадает с рассматриваемым диапазоном используемых температур. Удельная поверхность порошков, синтезированных методом ТМВ оказалась не столь значительной и дает основание говорить о том, что главной причиной изменения реакционной способности при термомеханической обработке является не столько уменьшение размеров частиц порошков, сколько увеличение концентрации их дефектов.

В случае второго варианта, предлагаемого модифицированного керамического метода для синтеза, в качестве исходных компонентов вместо оксидов были использованы карбонаты. Тогда при термообработке в области температур от 200 до 800 °С, при подъёме температуры, происходит в этом случае разложения карбонатов, что обеспечивает существенное возрастание концентрации дефектов. Это дефектность увеличивает скорость протекания химических реакций и соответственно образования продуктов ре-

акций. Для исследования был взят состав керамики в системе оксидов  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CuO}$ . Устройства, изготовленные на основе этого состава, нашли применение в области теплообмена и фотокаталитических процессов. Исходные порошки подвергались высокоэнергетическому диспергированию и дополнительная их термообработка после каждого диспергирования проводилась при температурах 900, 1000, 1200 °С.

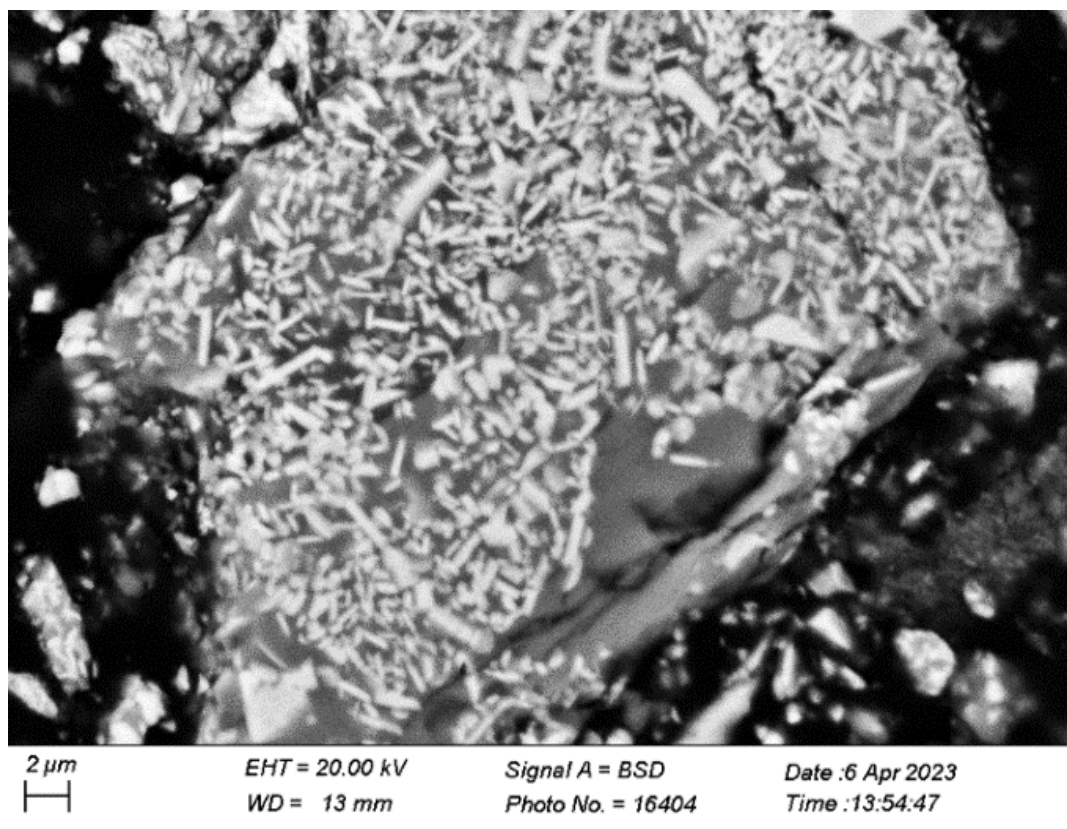
Количественный анализ микроструктурных особенностей и морфологии полученных композитов был проведён с помощью электронной микроскопии в режимах анализа излучения рассеянных электронов, картирования поверхности и получения диффузионных профилей концентрационного распределения элементов на границах раздела фаз. В случае использования ТМВ рентгенофазовый анализ показал, что основными фазами образовавшегося нанокompозита являются  $\text{SiO}_2$  и твердый раствор  $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$  (Рисунок 1).



★ - фаза на основе  $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ , ○ - фаза на основе  $\text{SiO}_2$ , △ - фаза со структурой шпинели.  
Рисунок 1 – Спектр рентгеновской дифракции для образцов, полученных метом ТМВ -1, после активации - 2, полученный из карбонатов -3

Остальные компоненты  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CuO}$ , которые представлены в небольшом количестве, распределяются в данных фазах. Вместе с тем отмечается, что в спектре есть ещё рефлексы, метастабильных фаз возникших в результате обработки порошка в условиях ТМВ. Для окончательной способности этих керамических порошков генерировать импульсное ИК излучение была проведена их активация, также импульсным инфракрасным излучением дальнего диапазона длин волн. Эти импульсы имели острый фронт и соответствующую интенсивность. В случае ТМВ оказалось, что такая активация привела к фазовым изменениям с образованием дополнительной третьей фазы, которая имеет структуру шпинели и представляет собой твердый раствор следующих соединений  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CaCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SiFe}_2\text{O}_4$ . Было также установлено, что фазы, присутствующие в нанокompозитах, синтезированных в данном исследовании, совпадают с фазами материала, полученного по гелиотехнологии.

Установлено в последствии, что испытания, изготовленных с применением данного материала приборов, также показали совпадение их технических характеристик, с аналогичными характеристиками устройств, в которых рабочий слой был синтезирован по трудно масштабируемой гелиотехнологии в специальной солнечной печи. Было замечено, что повышение дефектности при использовании карбонатов в качестве исходных компонентов привело возникновению аналогичных трёх типов фаз продукта сразу после синтеза ещё до активации порошка. То есть в данном случае ускоренной массоперенос обеспечил более быстрое протекание химических реакций (Рис. 2).



темный цвет -  $\text{SiO}_2$ , светлый цвет -  $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ , серый цвет – шпинель  
Рисунок 2 - Микрофотографии образца из карбонатов системы Cr-Si-Fe-Ca-Al-Mg-Cu-O (обжиг 1200 °C)

При исследовании микроструктуры и морфологии полученной керамики в условиях исследования поверхности в режиме рассеянных электронов, вследствие различия коэффициента отражения электронов для элементов, отличающихся атомными номерами, на изображениях поверхности образцов появляется контраст для имеющихся фаз. Определение составов этих фаз проводилось методом рентгеновского энергодисперсионного анализа. Установлено, что между фазами образуются плотные, без промежутков, границы. Этот факт является важным обстоятельством с точки зрения объяснения механизма генерации импульсного ИК излучения, которое происходит именно на границах раздела фаз. При этом количественный энергодисперсионный анализ подтвердил результаты рентгенофазового анализа.

Таким образом использование модифицированной керамической технологии помогает найти эффективные пути синтеза многокомпонентной керамики для генерации импульсного инфракрасного излучения дальнего диапазона, аналогичной керамике, произведённой в высокотемпературном режиме на гелиоустановке

#### Список литературы

- [1] Рахимов Р. Патент США № № US 5,707,911, - 13.01.1999.
- [2] Рахимов Р. Патент США № US 6,200,501 B1, 13.03.2001.
- [3] Летюк Л.М., Паньков В.В., Литвинов С.В., Механизм образования MnZn ферритов в условиях термовибропомолы // Порошковая металлургия. – 1988. – № 11. – С. 36 – 41.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной научно-технической программы РУз в рамках научного гранта № ФА-Ф-4-005 и в рамках проекта Узбекистан-Беларусь IL-4821091614, а также Белорусского фонда фундаментальных исследований, договор № X22УЗБ-033.

## СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЖК МОДУЛЯТОР, УСТОЙЧИВЫЙ К МЕХАНИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета.  
Минск, Беларусь.

Синтезированы ахиральные смектические С соединения, содержащие 4 – 5 фенильных колец, так называемые 4,4'-дизамещенные кватерфенилы и 4,4'-дизамещенные-пентафенилы, которые имеют последовательно соединенные бензольные кольца, не разделенные мостиковыми фрагментами. Разработаны новые сегнетоэлектрические жидкокристаллические композиции с оптимизированными параметрами. Показана возможность создания модулятора на основе жидкокристаллических сегнетоэлектриков со временем переключения менее 10 мкс, устойчивого к механическим деформациям.

Сегнетоэлектрический жидкокристаллический модулятор (СЖМ) является уникальным ЖК-устройством благодаря своим характеристикам: микросекундное время электрооптического отклика, широкий угол обзора, возможность реализации оптической бистабильности. Однако существует проблема создания устойчивых к механическим воздействиям СЖМ из-за появления необратимых зигзагообразных дефектов, которые ухудшают электрооптические свойства устройства. Неустойчивость структуры смектических слоев к механической деформации является основной проблемой при производстве СЖМ [1 – 3]. Механическое воздействие на образец приводит к деформации слоев и в конечном итоге к необратимому разрушению ориентации и появлению дефектов.

Мы разработали новые сегнетоэлектрические жидкокристаллические материалы, восстанавливающие свою слоистую структуру после механического воздействия.

Для этого были синтезированы четырех- и пятикольчатые ахиральные смектические соединения (Таблица 1).

Таблица 1

Структурные формулы и мезоморфные свойства ахиральных соединений

Соединение	Химическая формула	Температуры фазовых переходов, °С
SC-1		КФ 128 СФ С 152 СФ А 205 ИФ
SC-2		КФ 59 СФ С 155 СФ А 162 ИФ
SC-3		КФ 56 СФ С 204 НФ 292 ИФ
SC-4		КФ 68 СФ С 176 СФ А 204 НФ 312 ИФ

Примечание: КФ – кристаллическая фаза; СФ – смектическая фаза (А, В, С, Е и т.д.); НФ – нематическая фаза; НФ\* – хиральная нематическая фаза; СФ\* – хиральная смектическая фаза (А, В, С, Е и т.д.); ИФ – изотропная фаза.

Были также синтезированы две хиральные добавки (Таблица 2).

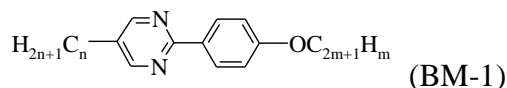
Таблица 2

Структурные формулы и мезоморфные свойства хиральных добавок

Соединение	Химическая формула	Температуры фазовых переходов, °С
FC-1		КФ 64,2 СФ С* 92,1 СФ А 96,3 ИФ
FC-2		КФ 77,2 ИФ

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

В качестве базовой использовали матрицу на основе 4,4'-ди-замещенных-фенилпиримидинов:



$n = 10, m = 9$ : 24,4 % по массе;  $n = 8, m = 8$ : 32,6% по массе;  $n = 8, m = 9$ : 43,0 % по массе.  
КФ < -20°C СФ С 59,4°C СФ А 68,3°C НФ 70,5°C ИФ

Ахиральные смектические соединения SC-2, SC-3 и хиральные добавки FC-1, FC-2 смешали с базовой смесью BM-1 в различных концентрациях. Это привело к созданию смесей А (x, y) (SC-2 и FC-1 в сочетании с BM-1), В (x, y) (SC-2 и FC-2 в сочетании с BM-1), С (x, y) (SC-3 и FC-1 в сочетании с BM-1) и D (x, y) (SC-3 и FC-2 в сочетании с BM-1); x – массовая доля ахиральных молекул; y – массовая доля хиральных молекул.

Физические и электрооптические свойства разработанных смесей приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Физические и электрооптические свойства разработанных смесей

Смесь	Спонтанная поляризация, нК/см <sup>2</sup>	Угол наклона в слое, град.	Время отклика, мкс
A (10,20)	58	29	7
A (20,10)	28	28	12
A (20,20)	53	27	8,0
B (10,20)	50	26	11
B (20,20)	48	25	12
C (20, 10)	31	31	13,2
C (20, 20)	45	30	8,5
D (20, 10)	29	29	13,5
D (20, 20)	43	28	9,2

Все ячейки, заполненные приготовленными смесями, не имели дефектов и были устойчивы к механическим деформациям. Для исследования влияния энергии сцепления на механическую стабильность были изготовлены ячейки с различной толщиной ориентирующего слоя (от 15 до 90 нм). Измерения коэффициента контрастности проводились сразу после заполнения ячейки и после механической деформации. При деформации толщина ячеек изменялась более чем на 50 %. Для всех смесей наблюдалась устойчивость к механическому воздействию в широком диапазоне концентраций хиральных добавок; это показано на рисунке 1 в сравнении со смесью FLC-1 на основе четырехкольчатых хиральных соединений из наших предыдущих исследований [4 – 8].

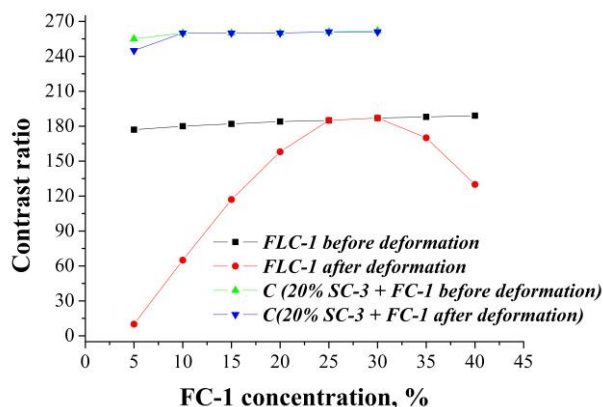


Рисунок 1. Коэффициент контрастности для ячеек, содержащих сегнетоэлектрическую ЖК смесь с различными концентрациями хиральной добавки FC-1 до и после приложения механического напряжения (геометрическое отклонение 60 %).

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Для смесей с различными концентрациями пятикольчатых ахиральных смектических С соединений мы наблюдали устойчивость к механическому воздействию в широком диапазоне концентраций ахиральной добавки (рис.2).

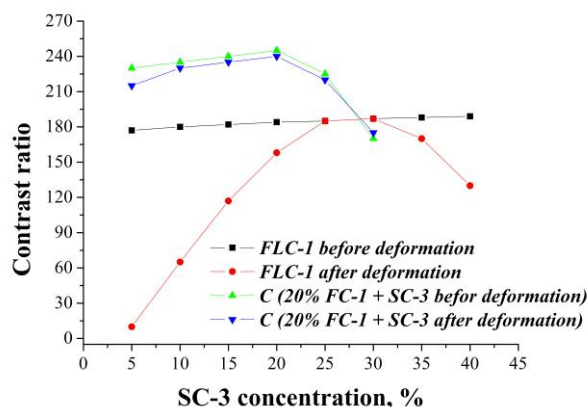


Рисунок 2. Коэффициент контрастности для ячеек, содержащих сегнетоэлектрические ЖК смеси с различными концентрациями ахирального соединения SC-3 до и после приложения механического напряжения (геометрическое отклонение 60 %).

Исследования показали, что высоковязкие сегнетоэлектрические смеси с 4,4'-дизамещенными пятикольчатыми ахиральными соединениями являются гораздо более устойчивыми к механической деформации по сравнению со смесями, содержащими 4,4'-дизамещенные четырехкольчатые хиральные соединения.

#### Список литературы

- 1 Clark N, Lagerwall S. Submicrosecond bistable electro-optical switching in liquid crystals. *Appl Phys Lett.* 1980; 36:899-901.
- 2 Kodan M, Katsuse M, Tagawa A, Tamai K, Itoh N, Miyoshi S, Wada T. Ferroelectric Liquid Crystal Display. *Jpn J Appl Phys.* 1992; 31:3632-3637.
- 3 Rieker T, Clark N, Smith G, Parmar D, Sirota E, Safinya S. "Chevron" Local Layer Structure in Surface Stabilized Ferroelectric Smectic C Cells. *Phys Rev Lett.* 1987; 59:2658-2661.
- 4 Lapanik V, Bezborodov V, Minko A, Sasnouski G, Haase W, Lapanik A. Defect-free FLC's with high optical quality based upon new FLS's, *Ferroelectrics.* 2006; 344:205-211.
- 5 Lapanik V, Bezborodov V, Lapanik A, Haase W. XRD study of new FLC's correlation between the chemical structure of molecules, the sign of the optical rotation and the tilt angle, *Ferroelectrics.* 2006; 343:127-132.
- 6 Lapanik V, Bezborodov V, Timoseev S, Haase W. Shock-free ferroelectric liquid displays with high optical contrast. *Appl Phys Lett.* 2010; 97:251913-251917.
- 7 Lapanik V, Bezborodov V, Sasnouski G, Lapanik A, Haase W. Shock-free ferroelectric liquid crystal compositions: optimized chiral compounds and their mixing ratio with non-chiral components. *Mol Cryst Liq Cryst.* 2011;542:48-55.
- 8 Lapanik V, Bezborodov V, Sasnouski G, Haase W. Thin Ferroelectric Liquid Crystal layers: mechanical stability and fast electrical response, connection between molecule design and surface properties. *Liq Cryst.* 2013;40:1391-1397.



## КАПСУЛИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРОМ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ С НИЗКИМ ЗНАЧЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета.  
Минск, Беларусь.

Объектом исследования являются капсулированные полимером жидкие кристаллы. Данный композитный материал представляет собой полимерную пленку, в которой диспергирован жидкий кристалл в виде отдельных капель или связанных между собой пор. Цель работы – разработка новых композитных материалов с улучшенными физико-химическими и электрооптическими свойствами для различных применений.

Последние достижения в области пленок капсулированных полимером жидких кристаллов (КПЖК) привели к значительному прогрессу в создании недорогих электрооптических устройств, способных переключаться из режима рассеяния в режим пропускания в зависимости от напряжения, приложенного к пленке [1 – 3]. Однако существует несколько недостатков таких композитов: низкая контрастность, узкий рабочий температурный диапазон, деградация при высоких температурах, большое управляющее напряжение (от 50 до 80 вольт). В статье представлены результаты исследований в области пленок КПЖК с низким управляющим напряжением на основе оптимизированных жидкокристаллических композиций.

В исследовании использовались нематические соединения (около 30) с различными полярными группами (F, OCF<sub>3</sub>, NCS, CN) и разными значениями оптической анизотропии  $\Delta n$  (от 0,16 до 0,29) с  $n_o \sim 1,52 - 1,53$  на длине волны 589 нм, 20°C. Характеристики мутности (haze) измерялись с помощью колориметра COH 400 (Nippon Denshoku Industries Co. Ltd.) в соответствии со стандартом ASTM D1003-97. Жидкие кристаллы и фотополимеры смешивали при комнатной температуре до получения однородной смеси. Смесь отверждалась под действием УФ-излучения с длиной волны 365 нм. Для исследования были выбраны пять фотополимеров от разных производителей. Они имеют различную вязкость и коэффициент преломления (таблица 1).

Таблица 1

Физико-химические свойства некоторых изученных фотополимеров

	Loxreal 30-21	MD MUV.20	NOA 63	NOA 65	NOA 81
Вязкость при 25°C, сантипуаз	1000	1500	2000	1200	300
Термостойкость, °C	-55 +120	-40 +125	-60 +125	-60 +125	-60 +125
Показатель преломления	1,50	1,49	1,56	1,524	1,56

Эксперименты показали, что только NOA 65 (Norland Products Inc.) полностью смешивается с жидким кристаллом и что только смесь NOA 65 + ЖК стабильна в течение длительного периода времени.

Сначала были приготовлены смеси ЖК с различными полярными группами (CN, NCS, F и OCF<sub>3</sub>) и показателями преломления (0,16 – 0,29) с использованием доступных соединений. Соединения с полярной группой CN оказались наиболее перспективными для дальнейших экспериментов. Также было обнаружено, что композиции на основе трех- и четырехкольчатых соединений имеют тенденцию разделяться на слои после смешивания с полимером. Поэтому такие соединения, как правило, непригодны. Кроме того, первые эксперименты выявили необходимость синтеза новых ЖК соединений. Было синтезировано десять со-

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

единений с большой оптической анизотропией и восемь с большой диэлектрической анизотропией. Из соединений с полярной CN-группой, неполярных соединений и новых синтезированных соединений были приготовлены нематические ЖК-смеси с различным двулучепреломлением. Смесь КПЖК была приготовлена путем смешивания этих ЖК с NOA 65 в различных соотношениях (30% к 70% по массе, 40% к 60% по массе, 50% к 50% по массе) для определения оптимальных соотношений, при которой достигается наиболее плотное состояние рассеяния. Также исследовалось влияние времени полимеризации на параметры пленок КПЖК. Было исследовано около 30 смесей. Результаты измерений лучших пленок КПЖК приведены в таблице 2.

Таблица 2

Электрооптические свойства некоторых исследованных смесей

Смесь	Пороговое напряжение $V_{10}$ , В	Напряжение насыщения $V_{90}$ , В	Мутность во включенном состоянии, %	Мутность в выключенном состоянии, %
1	13	39	2	73
2	10	35	2	70
3	6	12,8	1,8	89
4	18	37	1,9	74
5	15	32	1,9	71
6	7	17	2	88
7	11	29	1,8	75
8	10	27	1,7	73
9	5	9,6	2,6	90
10	19	48	2,2	66
11	18	38	2,1	69
12	12	26	2	77
13	10	23	2	75
14	7	17	2	78
15	10	24	1,5	78
16	9	22	1,5	83
17	6	12,8	1,8	79
18	3	8	2	77
19	7	17	1,8	86
20	4,8	9,8	1,8	78
21	5	9,6	2	80

Смеси 12, 17 и 21 имеют широкий диапазон рабочих температур: от менее чем  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$ .

После анализа полученных результатов приготовлены образцы пленок КПЖК с оптимальными на данный момент параметрами на основе оптимизированной нематической жидкокристаллической смеси (Таблицы 3 – 4, рис.1).

Таблица 3

Электрооптические параметры оптимизированной композиции

Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	Пороговое напряжение $V_{10}$ , В	Напряжение насыщения $V_{90}$ , В	Мутность во включенном состоянии, %	Мутность в выключенном состоянии, %
-25 +75	7	17	1,5	94

В результате исследования были улучшены следующие параметры пленки КПЖК: увеличен диапазон рабочих температур (от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+75^{\circ}\text{C}$ ); увеличена мутность в режиме рассеяния ( $>90\%$ ); уменьшена мутность в прозрачном состоянии ( $<2\%$ ).

Молекулярная структура и состав оптимизированной смеси

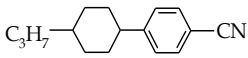
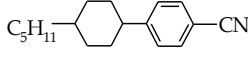
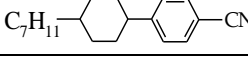
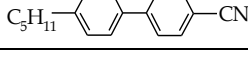
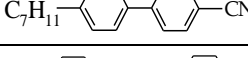
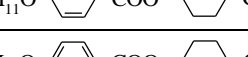
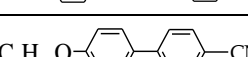
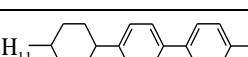
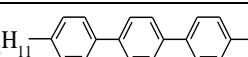
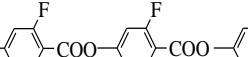
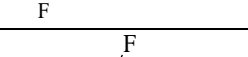
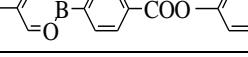
Соединение	Соотношение компонентов, % по массе
	5,0
	7,0
	6,5
	8,0
	6,5
	12,0
	12,0
	3,5
	4,5
	5,0
	5,0
	25,0



Рисунок 1. Образец пленки КПЖК.

## Список литературы

- 1 Li C, Chen M, Shen W, Chen G, Zhang L, Yang H A study on the polymer structures and electro-optical properties of epoxy-mercaptan-based polymer dispersed liquid crystal films. *Liq Cryst*, 2019; 46:1718-1726.
  - 2 Zhong T, Mandle R, Goodby J, Zhang L, Zhang C. Comparative studies of polymer-dispersed liquid crystal films via a thiol-ene click reaction. *Polym Adv Technol*, 2019; 30:2781-2789.
- Shen W, Wang L, Zhong T, Chen G, Li C, Chen M, et al. Electrically switchable light transmittance of epoxy-mercaptan polymer/nematic liquid crystal composites with controllable microstructures. *Polymer*, 2019; 160:53-64

## **СЕКЦИЯ 5.**

# **АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЗЗ**

УДК 521.31

Баранова В. С., Спиридонов А. А., Евчик В. Е., Черный В. Е., Шалатонин И. А.,  
Лешкевич С. В., Ушаков Д. В., Саечников В. А.

## **ВСЕНАПРАВЛЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Представлены результаты количественной оценки сеансов обнаружения радиосигналов с группировок сверхмалых космических аппаратов Swarm Technologies и Spire всенаправленной антенной системой. Численная модель позволила определить временные интервалы сеансов приёма, а также время, за которое каждый пико- и наноспутник группировки регистрируется наземной станцией. В условиях радиовидимости антенной системы восстановлен профиль конфигурации распределения орбитальных плоскостей рассматриваемых группировок.

Тенденция активного развёртывания крупномасштабных орбитальных группировок [1] требует адаптации технологий построения наземного сегмента для их обслуживания. Новое поколение наземных станций смещается в сторону простых и легковесных, электрически контролируемых систем, которые исключают глобальные конструкции с механическим управлением. Основной причиной развития альтернативных решений является необходимость снижения стоимости проектирования и эксплуатации отдельных станций в составе распределённых сетей с сохранением оптимальных характеристик приёма в условиях масштабирования орбитальных группировок. В настоящее время исследуется использование фазированных антенных решёток UHF/VHF диапазона для приложений сверхмалых космических аппаратов (СМКА) – наноспутников и пикоспутников [2]. Основным преимуществом ФАР, помимо предсказания направления прихода сигнала без механического перемещения системы, является способность обеспечивать одновременный приём с нескольких спутников на разных частотах. Но, ключевой задачей при развёртывании группировок является установление устойчивой связи в первые дни полёта. Как правило, начальное решение орбиты перед запуском достаточно приближенное, поэтому использование узконаправленных антенн с поворотными устройствами для поиска и установления связи с космическими аппаратами не эффективно с точки зрения вероятности наведения в нужную область пространства. В данном случае, оптимальнее рассматривать антенные системы, которые обеспечивают фиксированный всенаправленный контроль максимального объёма небесного пространства с локального наземного сегмента.

Всенаправленное сканирование в стационарном режиме позволяет решать не только задачу поиска космических аппаратов в первые дни полёта, но и задачу обнаружения незарегистрированных или потерянных спутников. Немаловажным является определение возможности сбора информации с различных группировок, установление временных интервалов сеансов приёма, исследование конфигурации орбитальных плоскостей космических аппаратов и определение сходящих орбит.

В качестве системы всенаправленного сканирования может быть представлен массив 4-х аксиально симметрично расположенных стационарных антенн волновой канал с круговой поляризацией и углом наклона относительно горизонтальной плоскости  $30^\circ$ . Диаграммы направленности каждой антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях идентичны с шириной главного лепестка  $60^\circ$ .

Процесс предварительного анализа возможностей для поиска всенаправленной антенной системой показан на основе количественной оценки сеансов обнаружения радиосигналов с известных группировок пикоспутников Swarm Technologies и Spire. Численная модель прогнозирования сеансов приёма в условиях радиовидимости антенной системы позволила восстановить профиль конфигурации распределения орбитальных плоскостей рассматриваемых группировок.

Расчёт прохождения группировки из 124 пикоспутников SpaceVee стандарта 1/4U CubeSat (весом 0,4 кг) проведён на 12 ч интервале наблюдений от 0:0:0 до 12:0:0 за 12.04.2023. СМКА SpaceVee, разработанные фирмой Swarm Technologies Inc., решают целевые задачи двусторонней спутниковой связи и ретрансляции данных. Было получено, что высоты орбит спутников на момент моделирования составляли от 185 до 550 км, наклонение - от 97,15 до 97,6 градусов. 5 орбитальных плоскостей распределены по долготе восходящего узла на 105,3°; 146,7°; 162,8°; 186,2°; 237,5°. В каждой плоскости наблюдалось равномерное распределение спутников по аргументу широты.

Проводилось моделирование приема радиосигналов телеметрии СМКА SpaceVee с интервалом в 30 с всенаправленной антенной системой университетской НСП (с минимальным углом места 5°), как показано на рисунке 1 (а). Получено, что университетская антенная система всенаправленного поиска в течении 9 часов примет радиосигналы 116 СМКА (8 спутников находятся на сходе с орбиты и не могут быть приняты). При этом в течении первых двух часов принимались радиосигналы от спутников, находящихся в орбитальной плоскости с долготой восходящего узла на 237,5° (номера 40-60), как показано на рисунке 1 (б) с помощью антенн, диаграммы направленности которых отслеживают азимуты от 180° до 240° (Ант 3) и 270° до 330° (Ант 4). На интервале от 2 ч до 8 ч в зоне радиовидимости антенной системы пролетали спутники, находящихся в орбитальной плоскости с долготой восходящего узла на 105,3° (номера 60-80). Радиосигналы этих спутников принимались последовательно с помощью антенн, диаграммы направленности которых отслеживают азимуты от 0° до 60° (Ант 1) и от 90° до 150° (Ант 2), затем с помощью антенн Ант 3 и Ант 4. На интервале от 6 ч до 12 ч в зоне радиовидимости антенной системы пролетали спутники, находящихся в близких орбитальных плоскостях с долготой восходящего узла на 146,7°; 162,8°; 186,2° (номера 1-40 и 80-120). Также как и для предыдущих спутников вначале прием осуществлялся антеннами Ант 1 и Ант 2, потом с помощью антенн Ант 3 и Ант 4. В конце 12 ч интервала моделирования антенны Ант 3 и Ант 4 приняли сигналы со всех 116 СМКА, в то время как Ант 1 и Ант 2 приняли сигналы от 110 СМКА. Данное построение группировки позволяет оценить угловое расстояние между плоскостями орбит. Так временной интервал между началом приема спутников, находящихся в орбитальной плоскости с долготой восходящего узла на 105,3° и началом приема спутников, находящихся в орбитальной плоскости с долготой восходящего узла на 162,8° составляет около 4 часов, что с учетом вращения земли с угловой скоростью 15°/ч дает оценку в разности угловых положений плоскостей орбит порядка 60°.

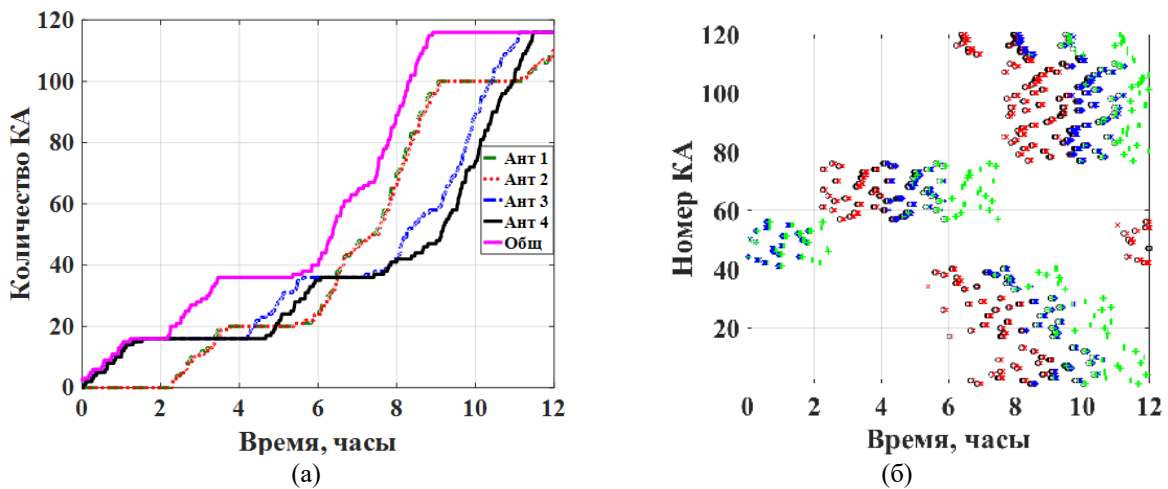


Рисунок 1 – Количество принимаемых КА группировки пикоспутников Swarm Technologies каждой антенной в отдельности и общее количество принимаемых КА (Общ) от времени (а); интервалы приема каждого КА антеннами (красные крестики-Ант1, черные кружки- Ант2, синие звездочки- Ант3, красные крестики-Ант4) от времени (б)

Расчёт прохождения группировки из 107 наноспутников Spire Global стандарта 3U CubeSat (весом 4,6 кг) также проведён на 12 ч интервале наблюдений от 0:0:0 до 12:0:0 за 12.04.2023. СМКА Lemur и Minas компании Spire решают целевые задачи исследование погодных явлений, автоматического слежения за подвижными объектами - самолетами и морскими судами. Было получено, что высоты орбит спутников на момент моделирования составляли от 200 до 650 км, наклонение - от  $36.9^\circ$  до  $97.7^\circ$  градусов. 10 орбитальных плоскостей практически равномерно распределены по долготе восходящего узла в интервале от  $6^\circ$  до  $245^\circ$ , одна орбитальная плоскость имела значение долготы восходящего угла  $308^\circ$ . В каждой плоскости наблюдалось равномерное распределение спутников по аргументу широты.

Проводилось моделирование приема радиосигналов телеметрии СМКА Spire Global с интервалом в 30 с всенаправленной антенной системой университетской НСП (с минимальным углом места  $5^\circ$ ), как показано на рисунке 2 (а). Получено, что университетская антенная система всенаправленного поиска в течении 9 часов примет радиосигналы 103 СМКА (4 спутника имеют наклонение меньше предельного для приема университетской НСП и не могут быть приняты). При этом, как показано на рисунке 2 (а-б) максимальное количество спутников принималось на интервалах от 0 до 2 ч и от 6 до 8 ч, когда в зоне радиовидимости антенной системы пролетали спутники, находящиеся в орбитальной плоскости с долготой восходящего узла от  $6^\circ$  до  $12^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $218^\circ$ ,  $238^\circ$  (для интервала 0 до 2 ч) и от  $150^\circ$  до  $200^\circ$  (для интервала 6-8 ч). Радиосигналы этих спутников принимались последовательно с помощью антенн Ант 1 и Ант 2 на первых пролетах каждого спутника над НСП, затем антенн Ант 3 и Ант 4 на последующих пролетах. В конце 12 ч интервала моделирования антенны Ант 1 и Ант 4 приняли сигналы с 91 СМКА, в то время как Ант 2 и Ант 3 приняли сигналы от 99 и 101 СМКА соответственно.

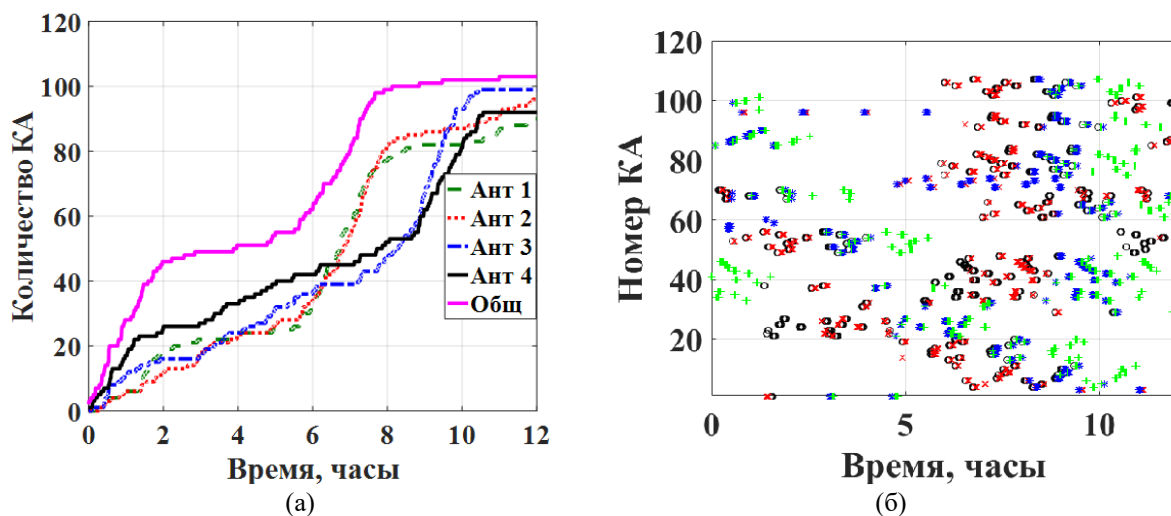


Рисунок 2 – Количество принимаемых КА группировки наноспутников Spire каждой антенной в отдельности и общее количество принимаемых КА (Общ) от времени (а); интервалы приема каждого КА антеннами (красные крестики-Ант1, черные кружки- Ант2, синие звездочки- Ант3, красные крестики-Ант4) от времени (б)

#### Список литературы

1. Nanosats and cubesats database. Nanosats database. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.nanosats.eu/database> <https://www.nanosats.eu/database> — Дата доступа: 12.04.2023.
2. Zaki, S. B. M., Kaya, N., & Cho, M. (2020). "Implementation of Adaptive Antenna Array for Ground Station Tracking System." Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 18(5), 199-208.
3. Спиридонов А. А., Баранова В. С., Саечников В. А., Ушаков Д. В. The regional nanosatellite constellation modelling formation by a piggyback launch from different spaceports // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. –2022. № 2. – С. 50-59.

UDC 530.122.1

Beglik V. V., Ohrymenko I. P., Kolchevskay I. N., Kolchevsky N. N.

## GRAVITY DETECTOR BASED ON CONSTELLATION OF SATELLITES

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,  
Minsk, Belarus

On today's date, there are 3 observatories operating worldwide for the detection of gravitational waves, with 67 events registered. A space-based gravitational wave measurement system called "S-LIGO-NxR-zy" has been proposed. Software has been developed for calculating the kinematic characteristics of S-LIGO using RAD Studio version 10.4.2 and the Delphi programming language. The system with different configurations of satellites based on Platonic bodies has been studied.

In 2017, the Nobel Prize in Physics was awarded for the observation of gravitational waves. The 2019 and 2020 Nobel Prizes in Physics also relate to astrophysics, and have given rise to new directions in astrophysical science, such as "black hole demographics." There are a large number of satellite systems operating in near-Earth space, including GPS, Galileo, GLONASS, Starlink, and others. In 2018, the Belarusian State University launched its own nanosatellite, which became the third satellite of Belarus. On August 31, 2020, the President of the Republic of Belarus signed a decree on the launch of a second scientific and educational satellite of the Belarusian State University.

It has been proposed to investigate a model of a space-based gravitational wave detector using an artificial satellite measurement system. The configurations of the satellites are based on polyhedra, such as Platonic solids. Platonic solids have a geometric symmetry that can improve the detector's sensitivity to gravitational waves, allowing the detection of gravitational waves with higher precision and resolution than existing detectors.

The software development was carried out in the RAD Studio 10.4 development environment using the Delphi programming language. The program interface was developed using the VCL (Visual Component Library) component and function library. The TeeChart library was used for visualization of calculation results, graphing, and visual analysis. The created 3D model was built using the GIScene visualizer. This software has various functions, such as setting up satellites and calculating their coordinates, setting the direction of satellite movement, altitude, and other important parameters.

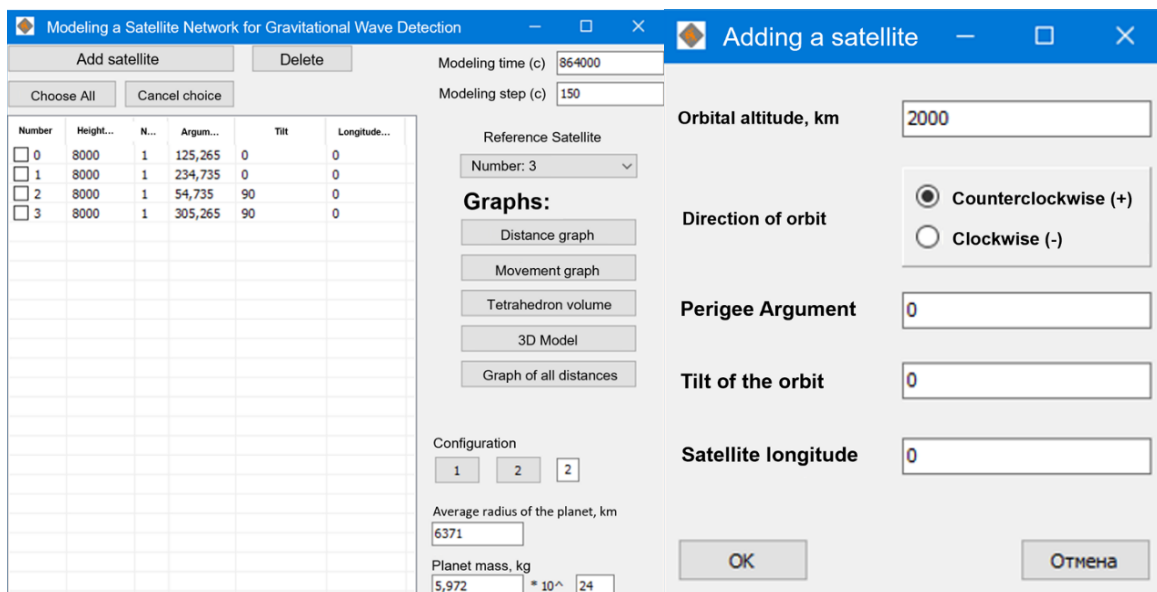


Figure 1 – Main program window, satellite addition window.



To perform calculations, it is necessary to set the characteristics of the orbit along which the satellites move. To specify the parameters and orientation of the orbit in space for an Earth orbiting satellite, six Keplerian elements or orbital elements should be specified:

- The semi-major axis "a" - the average distance between the Earth and the satellite.
- The inclination of the orbit "i" to the equatorial plane of the Earth.
- The right ascension of the ascending node (RAAN).
- The eccentricity "e".
- The mean anomaly "M0".
- The argument of perigee " $\omega$ ".

Since this work investigates the motion of satellites in circular or near-circular orbits, the height of the satellite above the Earth's surface (h) was used instead of the semi-major axis. The eccentricity of a circular orbit is equal to 1, so this parameter is not introduced when specifying the orbit parameters (see figure 1). The software provides various functions, such as setting up satellites and calculating their coordinates, specifying the direction of satellite movement, altitude, and other important parameters. It also allows for plotting graphs of the satellite system's motion in the XY, XZ, and ZY coordinate projections, graphing satellite distances, evaluating the quality of tetrahedron formation, 3D modeling of satellites with visualization of faces and orbits, adding/deleting configurations, and importing/exporting satellite configurations. The software is compatible with Windows 7 and later versions.

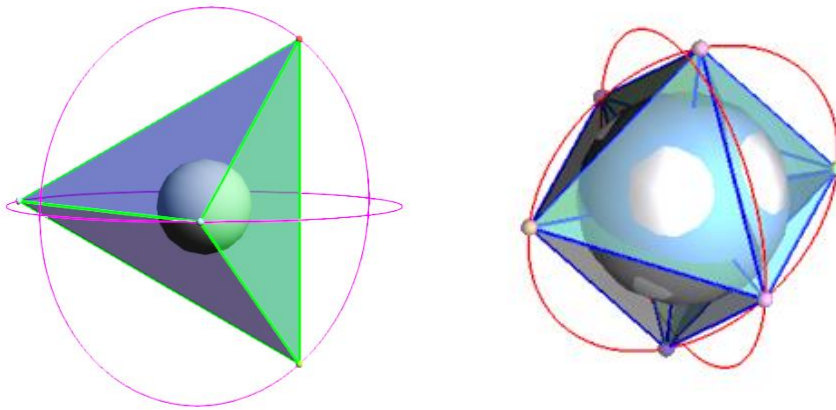


Figure 2 – Configurations of gravitational systems based on Platonic solids.

The idea is to use multiple platonic solids connected to each other to create a spatial structure that is sensitive to gravitational waves. When waves pass through this structure, they cause a deformation of its shape, which can be detected and measured. The use of platonic solids can allow for the creation of many different detector configurations that can be optimized for detecting specific types of gravitational waves. This could broaden the range of sources of gravitational waves that can be detected and studied. Software has been developed for calculating the kinematic characteristics of S-LIGO, which allows for the design and investigation of various satellite systems (Figure 1). The software runs on the Windows platform and enables the user to define satellite configurations and dynamically compute the distances between satellites, 3D shape parameters with visualization of facets, and satellite orbit parameters.

#### Reference

1. Abbot, B. P.// Exploring the sensitivity of next generation gravitational wave detectors / B. P. Abbott [et al.] // Class. Quantum Grav.2017.
2. Abbot B. P., Abbot R., Abbot T. D.// Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger Phys. Rev. Let.2016.
3. Weber J.//Gravitational-wave-detector events. Physical Review Letters.1968.
4. LIGO NEWS: LIGO Suspends Third Observing Run [Electronic resource] URL: <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200326>.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОМПОЗИТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МАЛЫМ ГАЗОВЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Настоящая работа посвящена описанию технологии построения различных продуктов по малым газовым составляющим в атмосфере для мониторинга состояния воздуха на основе данных различных спутниковых систем дистанционного зондирования Земли. В работе приводится краткий обзор таких спутниковых систем, описывается технология сбора исходных данных из различных центров распространения данных, а также все этапы автоматизированной обработки для построения композитных изображений, содержащих информацию о средней, минимальной и максимальной концентрации газового составляющего в атмосфере за различные временные периоды. На примере данных прибора TROPOMI европейского спутника Sentinel-5 приводятся примеры различных продуктов, построенных с помощью описанной технологии. Также приводятся основные возможности по анализу построенных продуктов, доступные в информационных системах.

**Введение.** Загрязнения атмосферного воздуха являются одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду и на здоровье населения. Повышение концентрации различных веществ в атмосфере разрушает озоновый слой Земли, приводит к возникновению кислотных дождей, к снижению плодородия почвы, воздействует на дыхательные пути человека, также вызывая изменения состава крови. Необходим комплексный мониторинг состояния воздуха. Для решения задачи мониторинга качества воздуха могут быть использованы данные с различных спутниковых систем ДЗЗ. При этом такие данные не только позволяют получать информацию о концентрации газового вещества в атмосфере в режиме близком к реальному времени, но и предоставляют эту информацию на труднодоступные территории, на которых получение оценок качества воздуха другим способом невозможно.

**Обзор данных.** На сегодняшний день существует значительное число спутниковых систем, предоставляющих данные с измерениями концентраций различных газов в атмосфере Земли. В Институте космических исследований в рамках развития информационных систем, функционирующих на базе Центра коллективного пользования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [1] осуществляется сбор, обработка и хранение таких данных. Для мониторинга состояния воздуха в информационных системах ИКИ РАН предоставляется доступ к данным концентраций следующих малых газовых составляющих: диоксид азота, диоксид серы, угарный газ, метан, озон, а также аэрозольный индекс, показывающий общее состояние качества воздуха. Сегодня основными используемыми спутниковыми системами для работы с данными о загрязнении воздуха являются: Sentinel-5P и AURA, на которых установлены приборы TROPOMI и OMI соответственно. При этом планируется расширение списка таких систем. В таблице 1 приведен список доступных продуктов в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» на сегодняшний день.

Таблица 1

Доступные продукты в архивах ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Спутник	Прибор	Газ	Доступность данных в архивах ЦКП
Sentinel 5P	TROPOMI	NO <sub>2</sub>	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	SO <sub>2</sub>	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	O <sub>3</sub>	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	CO	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	Aerosol	2018 по настоящее время
Sentinel 5P	TROPOMI	CH <sub>4</sub>	2018 по настоящее время
AURA	OMI	SO <sub>2</sub>	2006 - по настоящее время
AURA	OMI	NO <sub>2</sub>	2006 - по настоящее время
AURA	OMI	Aerosol	2008 - по настоящее время

**Технология построения композитных изображений.** Для удобства использования и анализа динамики состояния атмосферы, в том числе для построения долговременных рядов измерений, предпочтительно использовать статистические композиты за различные промежутки времени, например, за день, неделю, месяц и год. Под статистическим композитом понимается композитное изображение, содержащее информацию о максимальной, средней и минимальной концентрации газового составляющего в атмосфере. Технология была реализована на базе языка программирования python с использованием стандартных библиотек работы с растровыми и векторными данными. Таким образом, было создано автоматизированное программное обеспечение для построения временных статистических композитов. Созданное программное обеспечение позволяет создавать статистические временные композитные изображения за любой промежуток времени, а также может быть применимо к данным с любых спутниковых систем. При этом программное обеспечение является кроссплатформенным и может быть установлено на любую операционную систему. Сам процесс построения композитов состоит из трех основных этапов. На первом этапе проверяется наличие композитного изображения за определенный период в архивах ЦКП. Если записи о наличии такого продукта отсутствуют, инициируется процесс построения. Для начала из архивов ЦКП запрашиваются все исходные данные за определенный промежуток времени, после чего они переводятся в одну проекцию с одинаковыми параметрами (координата верхнего левого угла, пространственное разрешение и т. п.) и формируется изображение на весь мир. На последнем этапе запускается модуль аннотации, который формирует готовые продукты в требуемом формате, который необходим для добавления созданных продуктов в архивы ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Если же запись о наличии продукта в базе данных уже существует, запускается процесс проверки актуальности данных. В случае если оказывается, что композитное изображение уже сформировано, но без учета всех доступных в архивах данных, то есть требуется обновление продукта, запускается процесс построения композитного изображения с учетом актуальных данных. Продукты композитов строятся по территории всего Земного шара.

**Результаты работы.** С помощью описанной технологии был создан ряд информационных продуктов на территорию всего Земного шара. Эти продукты позволяют пользователям информационных систем выявлять устойчивые источники загрязнений, оценивать особенности пространственных распределений газовых составляющих и многое другое. Так, например, по композитным изображениям аэрозольного индекса, имеется возможность отслеживать распространение крупных лесных пожаров. На рисунке 1 показаны продукты композитных изображений с максимальными значениями аэрозольного индекса и средними значениями угарного газа за месяц во время крупных лесных пожаров в Сибири, которые начались в июле 2019 года.

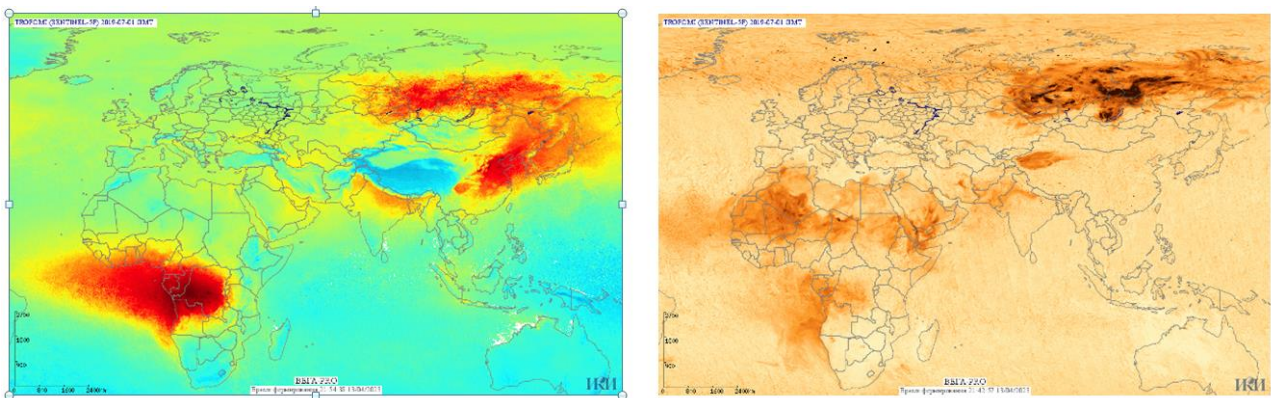


Рисунок 1 – Композитное изображение со средней концентрацией угарного газа слева и максимальным значением аэрозольного индекса справа по данным прибора TROPOMI спутника Sentinel-5P. Композитные изображения построены за временной период с 01.07.2019 по 31.07.19 во время крупных пожаров на территорию Сибири.

Для работы с информационными продуктами по малым газовым составляющим в информационных системах Vega-Science, <http://sci-vega.ru> пользователям доступен широкий круг возможностей и инструментов для анализа данных различных продуктов. Например, разработанная в ИКИ РАН технология «объектного» мониторинга позволяет рассчитывать значения различных показателей внутри произвольных полигонов исследуемых объектов. С помощью этой технологии в 2021 году был составлен рейтинг самых загрязненных диоксидом азота городов России. На рисунке 2 показан построенный средствами системы Vega-Science продукт «Цветосинтез» на котором хорошо видно, что заметный вклад в загрязнения воздуха вносят суда, перемещающиеся по стандартному маршруту, связывающему Европу с Восточной Азией.

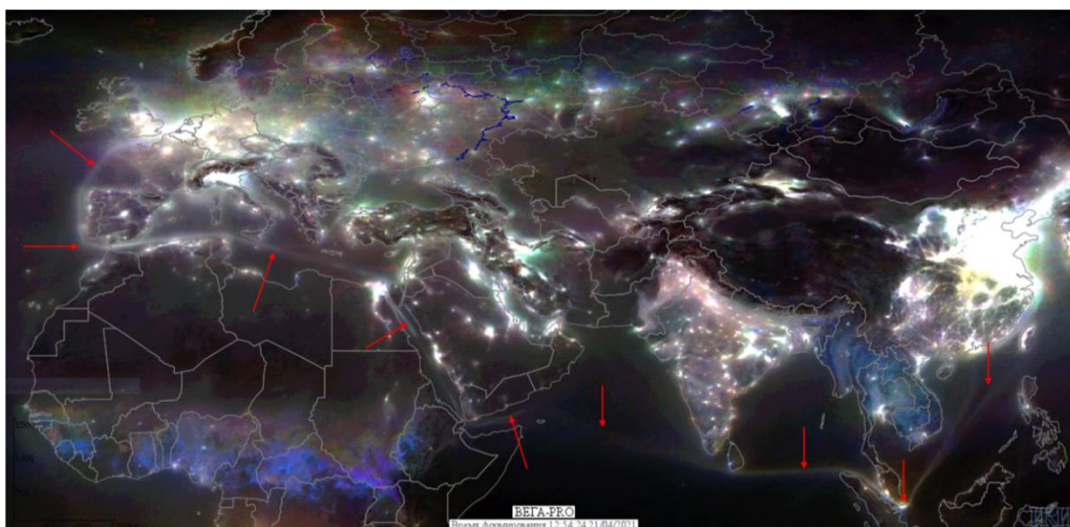


Рисунок 2 – Продукт «цветосинтез», на основе данных средних концентраций диоксида азота за 2018 (Red), 2019 год (Green), 2020 (Blue) годы по данным прибора TROPOMI спутника Sentinel-5P. Красными стрелками указан маршрут судов, связывающий Европу с Восточной Азией.

Таким образом, уже сегодня, реализованные на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» схемы сбора и автоматизированной обработки данных могут быть использованы для формирования ряда продуктов для оценки концентрации малых газовых составляющих на основе данных различных спутниковых систем ДЗЗ.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Работа выполнялась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

#### Список литературы

1. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашницкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

## УТОЧНЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ ПРИБОРА МСУ-МР КА «МЕТЕОР-М» №2-2

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

В докладе рассматривается применение корреляционных методов для увеличения точности привязки данных прибора МСУ-МР. Описывается двухступенчатая схема привязки с восстановлением параметров ориентации космического аппарата (КА). Приводится описание программного решения, особенности реализации и результаты привязки для снимков прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» №2-2, а также оценки производительности.

На космических аппаратах (КА) серии «Метеор-М» установлен шестиканальный прибор МСУ-МР низкого пространственного разрешения. Устройство снимает поверхность Земли в спектральном диапазоне от 0,5 до 12,5 мкм [1], что позволяет осуществлять мониторинг природных и антропогенных явлений для решения большого числа задач. Однако нестабильность ориентации аппарата является препятствием для обеспечения автоматической субпиксельной географической привязки данных прибора МСУ-МР. Недостаточно качественная привязка снимков существенно ограничивает их дальнейшее использование для решения задач дистанционного мониторинга экосистем.

Навигационные проблемы космического аппарата являются значительной помехой для использования моделей сенсора для привязки данных из-за неточности определения входных параметров для модели, таких как углы ориентации. В отсутствие достаточных исходных данных для получения субпиксельной точности привязки снимков с помощью модели, устранить дефекты привязки можно с использованием опорных, хорошо привязанных, данных при помощи алгоритмического поиска контрольных точек. Однако привязка снимков исключительно такими методами приводит к искажениям привязываемых данных из-за интерполяции значений пикселей в процессе преобразования. Поэтому для исключения потери данных при привязке было решено восстанавливать параметры для модели сенсора и с её помощью привязывать исходные данные МСУ-МР уровня L1B. Таким образом, предлагаемый процесс привязки состоит из трёх этапов: поиска контрольных точек, восстановления углов ориентации и применения модели сенсора к данным L1B.

В качестве метода поиска контрольных точек была выбрана корреляция. Для их нахождения применяется программный пакет AROSICS [2], в основе которого лежит фазовая корреляция, использующая теорему Фурье о смещении. В качестве опорных данных были выбраны ежемесячные композитные изображения SWIR-диапазона прибора MODIS, так как они имеют стабильную качественную привязку, лучшее (по сравнению с МСУ-МР) пространственное разрешение (250 метров против 1 километра), а также очищены от облачности, что снижает количество ложных срабатываний алгоритма. Корегистрация проецированных снимков (МСУ-МР и MODIS) приводит к определению взаимного расположения контрольных точек на парах изображений и получению их сдвигов относительно исходного положения.

Углы ориентации аппарата восстанавливаются, исходя из сдвигов полученных контрольных точек, таким образом, чтобы суммарная ошибка определения положения контрольных точек была минимальна.

Необходимыми и достаточными входными параметрами для строгой модели сенсора являются углы ориентации аппарата, элементы орбиты и характеристики устройства съёмки. Требуемые углы ориентации были восстановлены из контрольных точек, параметры орбиты КА «Метеор-М» №2-2 берутся из TLE. Характеристики съёмочного оборудования нам известны и постоянны. В результате модель сенсора применяется к неспроецированным данным МСУ-МР уровня L1B, и только потом снимки переводятся в проекцию.

## Секция 5. Аэрокосмические исследования и технологии ДЗЗ

Созданное решение было полностью автоматизировано и реализовано в составе штатных цепочек обработки. В результате были обработаны данные прибора МСУ-МР за 2022 год. Более 85 % допривязанных дневных снимков имеют субпиксельную точность привязки, что существенно увеличило возможности использования данных прибора для других задач дистанционного зондирования Земли.

Работы по совершенствованию созданного решения продолжаются. Основными направлениями являются оптимизация производительности, а также адаптация метода под ночные снимки, для которых отсутствуют опорные данные.

Работы выполняются при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

### Список литературы

1. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М». / Асмус В. В. [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 12. – С. 5-16.
2. AROSICS: An Automated and Robust Open-Source Image Co-Registration Software for Multi-Sensor Satellite Data. / Scheffler D. [et al.] // Remote Sensing. – 2017. – №9. – P. 676. <https://doi.org/10.3390/rs9070676>

УДК 681.7

Голубев Ю. В., Ивуть П. В., Ломако А. А., Хомицевич А. Д.,  
Домарацкий А. В. Беляев Б. И. Сосенко В. А.

## ВЫСОТНЫЙ КАЛИБРОВОЧНЫЙ ПУНКТ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СПУТНИКОВЫХ СЕНСОРОВ И ВАЛИДАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Для корректного функционирования видеоспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли необходима периодическая проверка соответствия характеристик данных, передаваемых с орбиты космического аппарата, либо с авиационного носителя, с данными, получаемыми с наземных приборов аналогичного назначения. При этом не менее важным является контроль состояния атмосферы для учета ее влияния на отражательные характеристики. В данной работе предлагается конструкция аппаратуры для мониторинга параметров небесной полусферы.

Целью работы является разработка и оборудование стационарного высотного калибровочного пункта валидации, панорамирования и сканирования тестовых площадок поверхности Земли для полетных калибровок спутниковых сенсоров, создания спектральных баз данных коэффициентов отражения природных и искусственных объектов для решения задач диагностики и мониторинга состояния объектов на поверхности Земли.

Работа выполняется в соответствии с техническим заданием на «Создание гиперспектральной сканирующей системы и высотного калибровочного пункта (ВКП) валидации» оп заказу Министерства образования Республики Беларусь

ВКП входит в состав системы калибровки и наведения (СКАН), и состоит из следующих основных узлов (Рисунок 1):

- блока контроля параметров съёмки (БКПС);
- блока спектральной съёмки (БСС);
- несущей опоры (НО).

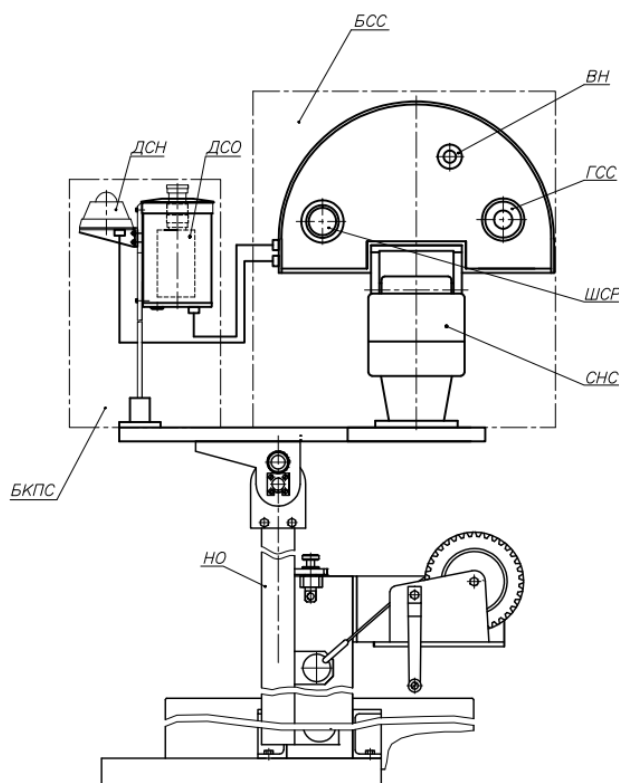


Рисунок 1 – Общий вид ВКП

Определяет порядок работы ВКП модуль управления и регистрации МУР.

В состав БКПС входят:

- датчик спектральной освещенности (ДСО);
- датчик состояния небесной полусферы (ДСН).

ДСО предназначен для регистрации освещенности и включает в свой состав малогабаритный спектрорадиометр (МС) с косинусной насадкой, регистрирующий спектры небесной полусферы в диапазоне 400–900 нм со спектральным разрешением 4 нм.

ДСН определяет балльность облачности и представляет собой направленную в зенит видеокамеру с широкоугольным объективом. ДСН выработывает команды отключения съемки при сплошной облачности и недостаточной освещенности (ночью).

В состав БСС входят следующие модули:

- гиперспектральная система;
- широкодиапазонный спектрорадиометр;
- видеокамера наведения;
- система наведения и сканирования по азимуту и углу вертикальной плоскости;
- датчик метеопараметров.

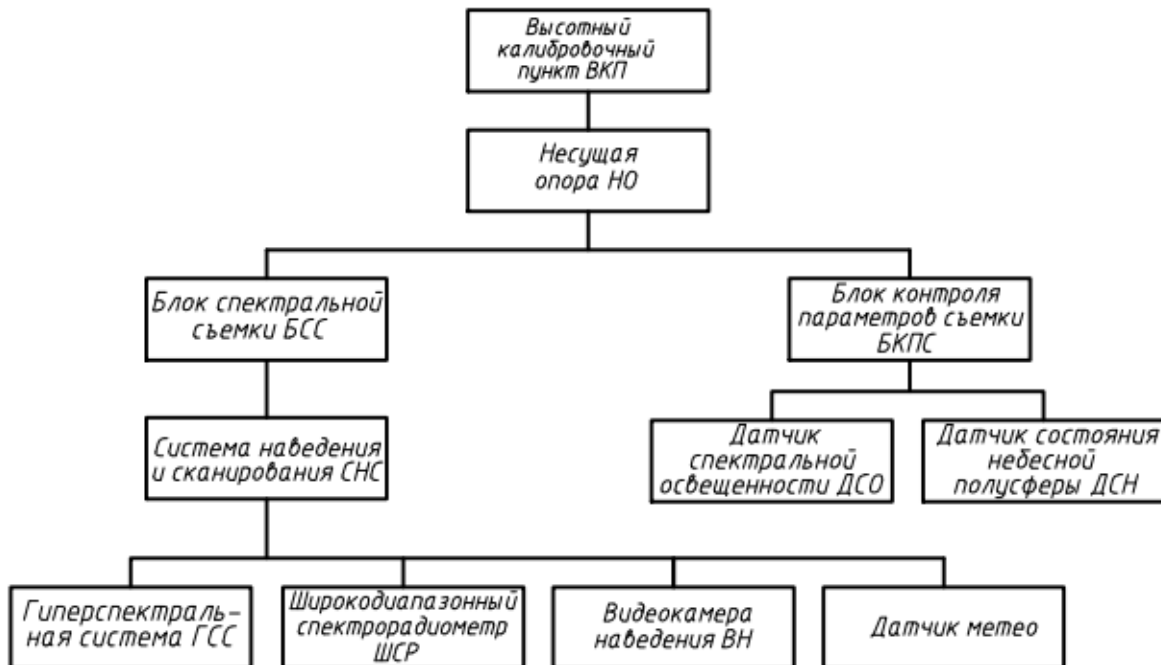


Рисунок 2 – структурная схема ВКП

Изделие СКАН предназначено для установки на полигонах, выбранных для решения задач полетной калибровки спутниковых сенсоров. ВКП размещается на несущей опоре, конструкция которой может модифицироваться в зависимости от места установки – отдельно стоящая вышка, телескопическая мачта, крыша высотного здания и т.д.

Планируется размещение экспериментального образца ВКП на крыше 9-ти этажного корпуса НИИ ПФП БГУ на специальной 3-х метровой мачте с механизмом спуска/подъема для проведения настроек и регламентных работ.

### Заключение

Разработан стационарный высотный калибровочный пункт валидации, панорамирования и сканирования тестовых площадок поверхности Земли для полетных калибровок спутниковых сенсоров, создания спектральных баз данных коэффициентов отражения природных и искусственных объектов для решения задач диагностики, мониторинга состояния объектов на поверхности Земли и мониторинга параметров небесной полусферы.



УДК 528.71

Гуторов А. В., Беляев Б.И., Бручковский И. И., Голубев Ю. В., Домарацкий А. В.,  
Ивуть П. В., Литвинович Г. С., Сосенко В. А., Хомицевич А. Д., Щербаков Н. Г.

## РАЗРАБОТКА СПЕКТРОСИНТЕЗАТОРА ДЛЯ ИМИТАТОРА КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЗЗ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени  
А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Описываемый синтезатор световых потоков является базовым элементом калибровочного оборудования, применяемого в ходе наземной калибровки оптических авиакосмических приборов. Приводятся особенности внутреннего взаимодействия элементов синтезатора световых потоков. Приведены особенности конструирования и реализации управления прибором.

### Введение

В настоящее время актуальными являются вопросы наземной калибровки оптического оборудования авиационного и космического базирования, моделирования в лабораторных условиях реальных спектров отражения солнечного излучения для выявления технических возможностей исследуемой аппаратуры различных систем дистанционного зондирования Земли. Для решения данных задач в НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ был разработан синтезатор световых потоков, который является базовым элементом имитатора дистанционных авиакосмических видеоспектральных измерений поверхности и атмосферы Земли.

### Конструктивные особенности

Излучатели света в синтезаторе световых потоков представлены 32-мя светодиодами в диапазоне длин волн от 395 до 1050 нм, их питающее напряжение 13-35 В, током 3.5 А и 4-мя лампами. Совокупная выделяемая в виде нагрева паразитная мощность светодиодов может принимать значение до 2700 Вт, до 1000 Вт у ламп, поэтому были поставлены и решены ряд сложных конструкторских задач по разработке системы жидкостного охлаждения (СЖО), с естественной циркуляцией. В СЖО интегрирован расходомер, который используется для учёта расхода воды и передачи сигналов в распределитель для автоматического аварийного отключения и активации звуковой сигнализации в случае отсутствия жидкости, или при протечках в системе. На рисунке 1 представлена регистрация спектров излучения с использованием спектросинтезатора и фотоспектрометра ФСР-02.

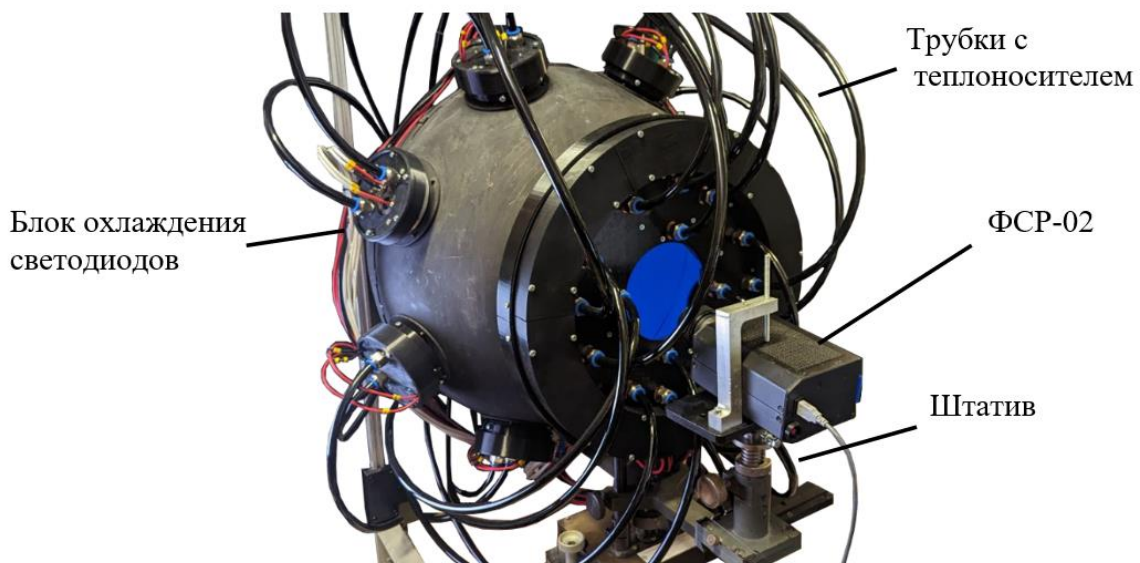


Рисунок 1 – Процесс регистрации спектров

Большинство светодиодов имеют отличное от других, используемых в синтезаторе, значение напряжения питания, которое может иметь отклонение от номинала  $\pm 1$  В, поэтому светодиоды были разбиты на 6 групп по напряжениям, а распределитель преобразовывает до необходимых значений напряжения от двух источников питания с выходными параметрами 33 В при токе 60 А и 22 В с током 60 А. В системе используется два источника питания, а не один, поскольку с одним источником питания

- появляется необходимость создавать дополнительную СЖО внутри корпуса распределителя, что значительно ухудшает надёжность системы;

- обязательным станет разработка более сложной, относительно имеющейся, системы питания и управления. Будут использованы электронные компоненты, размеры которых значительно больше, а количество элементов увеличится в разы.

- это может привести к дополнительным помехам и погрешностям в распределителе.

На рисунке 2 представлена схема спектросинтезатора, иллюстрирующая описанные выше взаимодействия блоков между собой.

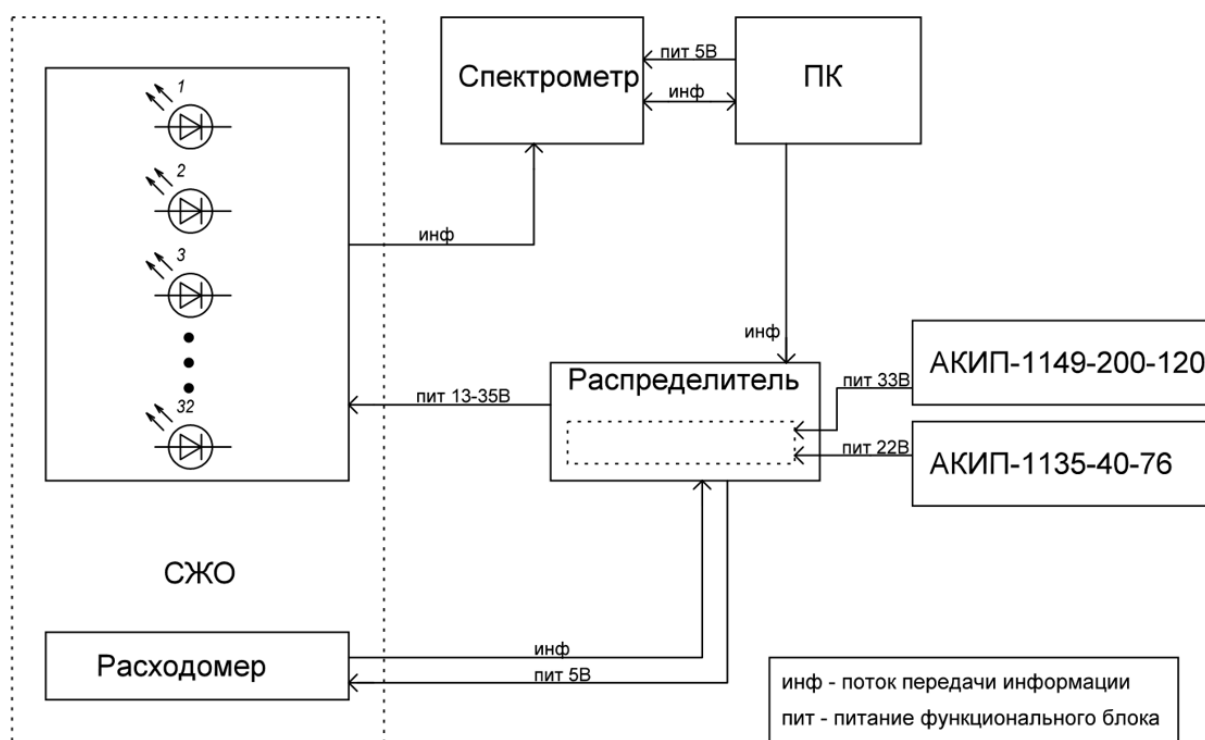


Рисунок 2 – Схема взаимодействия элементов

### Заключение

Разработанный спектросинтезатор может работать в диапазоне 395-1050 нм. Для управления и питания используется распределитель, преобразовывающий и стабилизирующий выходные напряжения. Пользователь персонального компьютера (ПК) с установленным на нём СПО задаёт параметры спектра света на выходе синтезатора световых потоков путём ввода команд для управления светодиодами, или выбирая предустановленные настройки. Каждый светодиод может управляться по отдельности, диапазон регулировок от 0 до 3.5 А.

Следующим этапом будет интеграция спектросинтезатора в имитатор космических экспериментов в виде отдельного модуля.

### Список литературы

1. Катковский, Л.В. Аппаратно-программный комплекс «Калибровка» для наземного спектрометрирования подстилающей поверхности и атмосферы/ Л.В. Катковский// секция: материалы VII Белорусского космического конгресса, Минск, 24-26 октября 2017 г. / ОИПИ НАН Беларуси; редкол.: Л.В. Катковский (отв. Ред.) [и др]. – Минск, 2017. - 36-40 с

## КОВАРИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЭС НА ПЕРЕМЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси,  
Минск

Предложена процедура ковариационного анализа спутниковых радиосигналов с использованием полного электронного содержания (ПЭС) на переменных временных интервалах. Установлено, что основная компонента спектральной плотности имеет максимальное значение за 9 - 12 часов до события (магнитной бури). Данное обстоятельство может быть использовано при решении задачи прогнозирования магнитных бурь.

Прогноз геомагнитных и сейсмических событий основан на пространственно-временном согласовании данных геофизических измерений и спутниковых сигналов. При этом радиометрический анализ динамических состояний ионосферы предполагает статистический анализ данных на основе ПЭС [1], [2].

При условии эргодичности случайной величины  $\xi$ , которая наблюдается в эксперименте, математическое ожидание по одной реализации со значениями  $x_1, \dots, x_n$  определяется по формуле [3]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

В качестве ряда измерений случайной величины  $\{x_i\}$  рассмотрим данные ПЭС ионосферы за месяц (март) 2015 года. Магнитная буря зафиксирована 17 марта 2015 г. в 18:00 (далее по тексту – событие).

Выделяем один день, содержащий  $m = [n/31]$  отсчетов, причем  $n$  – полное количество отсчетов за месяц ( $n=88000$ ). Соответственно, количество отсчетов за  $q$  дней будет равно:  $m_1 = [qn/31]$ . В дальнейшем предполагаем, что количество отсчетов, а также размерность

матриц являются целыми числами. Вычисляем математическое ожидание  $\bar{x}$  по формуле  $\bar{x} = \frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} x_i$  и формируем последовательность

$$y_i = x_i - \bar{x}, \quad i = \overline{1, m_1}.$$

Полученный набор данных делим на  $k$  частей ( $k = 4, 8, 16$ ) и формируем матрицы  $Y_{k \times N}$  размером  $k \times N$ ,  $N = m_1 / k$ . Далее вычисляем ковариационные матрицы:

$$R_{k \times k}^{(y)} = \frac{1}{k} Y_{k \times N} Y_{k \times N}^T,$$

т.е.

$$R_{4 \times 4}^{(y)} = \frac{1}{4} Y_{4 \times N_1} Y_{4 \times N_1}^T, \quad N_1 = m_1 / 4;$$

$$R_{8 \times 8}^{(y)} = \frac{1}{8} Y_{8 \times N_2} Y_{8 \times N_2}^T, \quad N_2 = m_1 / 8;$$

$$R_{16 \times 16}^{(y)} = \frac{1}{16} Y_{16 \times N_3} Y_{16 \times N_3}^T, \quad N_3 = m_1 / 16.$$

Затем решаем задачу на собственные значения с использованием встроенной функции для полученных ковариационных матриц  $R_{4 \times 4}^{(y)}$ ,  $R_{8 \times 8}^{(y)}$ ,  $R_{16 \times 16}^{(y)}$ . Данную процедуру повторяем для

Секция 5. Аэрокосмические исследования и технологии ДЗЗ

каждого из выбранных временных интервалов  $\Delta_j t = \{120; 48; 24; 12; 6; 2\}$ ,  $j = \overline{1, 6}$  (единичный интервал – 1 час) до наступления события.

Полученные собственные значения  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k = 8, 16$  в каждом временном интервале  $\Delta_j t$  разобьем на три группы: а)  $\lambda_1$ ; б)  $\lambda_2, \dots, \lambda_{k/2}$ ; в)  $\lambda_{(k/2)+1}, \dots, \lambda_k$ . Затем найдем средние значения во временном интервале:

$$\lambda_{1,j}^{(cp)} = \lambda_{1,j} / \Delta_j t, \quad j = \overline{1, 6};$$

$$\lambda_{2,j}^{(cp)} = \sum_{i=2}^{k/2} \lambda_i / ((k/2) - 1) \Delta_j t;$$

$$\lambda_{3,j}^{(cp)} = \sum_{i=(k/2)+1}^k \lambda_i / (k/2) \Delta_j t.$$

На рисунке 1 представлен график распределения осредненных собственных значений  $\lambda_{1,j}^{(cp)}$ . Аналогично определяются собственные значения на постоянных временных интервалах, в частности, при  $\Delta t = 6$  час., начиная с 51 часа до события (рисунки 2, 3).

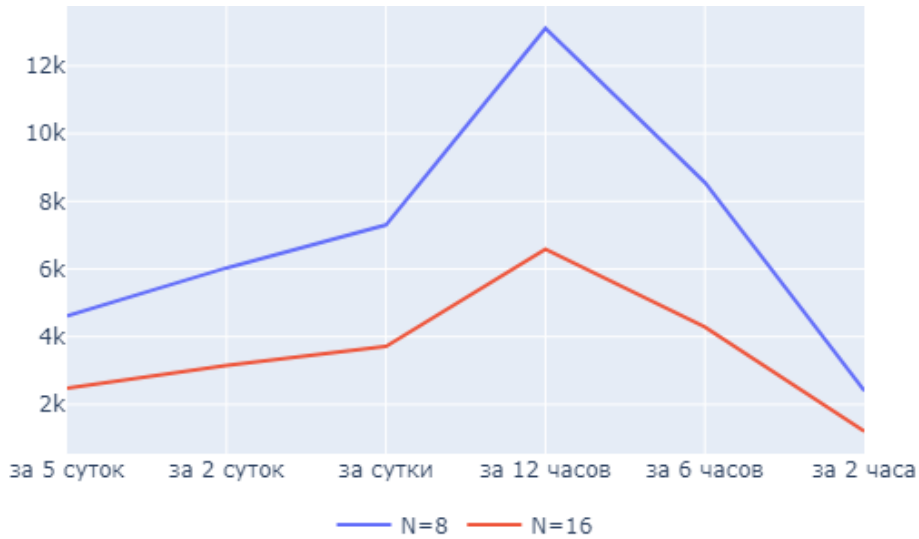


Рисунок 1 – График распределения осредненных собственных значений  $\lambda_{1,j}^{(cp)}$  для  $k=8$  (верхняя кривая) и  $k=16$  (нижняя кривая)

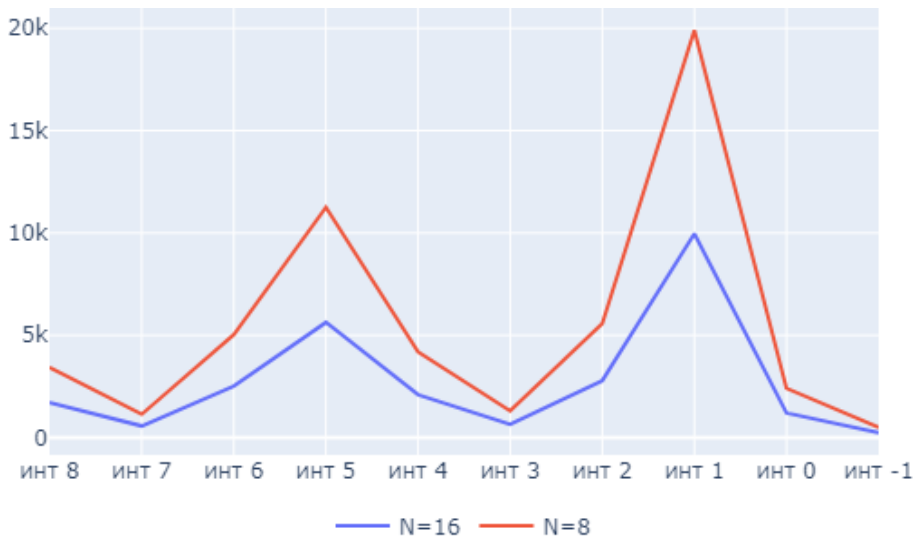


Рисунок 2 – График распределения осредненных собственных значений  $\lambda_{1,j}^{(cp)}$  на постоянных временных интервалах для  $k=8$  (верхняя кривая) и  $k=16$  (нижняя кривая)

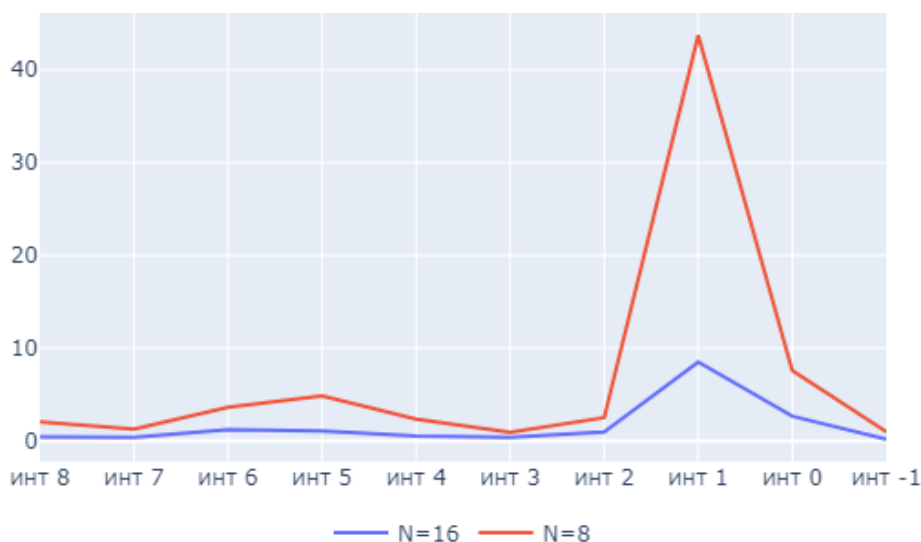


Рисунок 3 – График распределения осредненных собственных значений  $\lambda_{2,j}^{(cp)}$  на постоянных временных интервалах для  $k=8$  (верхняя кривая) и  $k=16$  (нижняя кривая)

Как видно из рисунков 1, 2, а также рисунка 3, максимальная величина основных компонент спектральной плотности  $\lambda_{1,j}^{(cp)}$  имеет место за 9 - 12 часов до события на переменных, а также на постоянных временных интервалах. Причем результаты моделирования указывают на то, что можно ограничиться только первой спектральной компонентой, Данное обстоятельство может быть использовано при решении задачи прогнозирования магнитных бурь.

#### Список литературы

1. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М.: Мир. – 1973.
2. Куницын В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
3. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. Изд. / С. А. Айвазян и др.; под ред. С.А. Айвазяна // М.: Финансы и статистика, 1989.

УДК 629.78:351.814.3

Евчик В. Е., Ушаков Д. В., Спиридонов А. А., Баранова В. С., Саечников В. А.

## **СТАНЦИИ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИИ С ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ЭКСПРЕСС АНАЛИЗА ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНО- И ПИКО- СПУТНИКОВ**

Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь

На данный момент на орбите Земли находится ~1190 действующих спутников, включая аппараты класса CubeSat [1]. Орбитальные параметры большинства из активных нано- и пико-спутников каталогизированы в общедоступных базах данных, что позволяет наземным станциям, находящимся в различных точках мира, принимать телеметрическую информацию. Обычно для новых спутников орбитальные параметры в общих базах данных появляются с задержкой в несколько дней, а некоторых случаях недель [2]. Одной из основных проблем, вызывающие эти задержки является сложности в быстром обнаружении и измерении орбитальных параметров спутников на орбите Земли.

Существующие станции приема для нано- и пико- спутников имеют аппаратные ограничения не позволяющие проводить анализ орбитальных параметров, либо слишком дорогие для воспроизведения в большом количестве для создания сети [3, 4]. Целью исследования являлось разработка прототипа наземной станции приема телеметрии и экспресс анализа орбитальных параметров нано- и пико- спутников с использованием точных временных меток и возможностями сети наземных станций. Задачами исследования являлись изучение методов обнаружения, измерения орбитальных параметров и способов временной синхронизации оборудования станций с последующим созданием прототипа.

Разработаны функциональные блок схемы для аппаратной и программной части станции приема телеметрии. Функциональная схема аппаратной части делится на 3 блока: блок приема (GNSS приёмник и часть станции, находящаяся на мачте антенны, позволяющие захватывать сигнал пролетающего нано- или пико- спутника и изменяющие характеристики антенной системы (поляризация антенны, углы поворота и тд.)); блок управления (аппаратная часть, управляющая отдельными приборами блока приёма такие как контроллеры поворотного устройства, переключатели поляризации, а так же дополнительные фильтры и усилители, стоящие на выходе с антенно-фидерного устройства); блок обработки сигнала (аппаратная часть устройств, предназначенных для оцифровки, декодирования и анализа параметров полученного сигнала в совокупности с аппаратной частью устройств точного выставления меток времени с использованием GNSS приёмника).

Программное обеспечение такой станции включает все необходимое для приема и обработки сигнала программное обеспечение, с важным критерием, что оно находится в свободном доступе для последующего лёгкого развёртывания сети из нескольких подобных станций. Программное обеспечение включает в себя: программу прогнозирования, вычисляющую с помощью входных орбитальных параметров местоположения спутника в необходимый момент времени или же в реальном времени для осуществления дальнейшего контроля параметров блока приема; программное обеспечение, необходимое для управления элементами аппаратной части, частоты приема, углов поворота и пр.; программное обеспечение для обработки принятого сигнала и выставления точных меток времени принятых пакетов телеметрии с использованием GNSS сигналов; базу данных для хранения данных и каталогизации принятых спутников.

На рисунках 1а,б продемонстрирован прототип станции приема и измерения орбитальных параметров нано- и пико- спутников. Данная станция позволяет принимать сигналы низкоорбитальных нано- и пико- спутников на радиоловительских частотах в диапазоне от 430МГц до 440МГц. Отличительной чертой для разработанной станции стало устройство обработки сигнала, включённое в блок обработки, показанный на рисунке 2, и собственная база

данных для хранения данных и каталогизации спутников. Устройство обработки сигнала, кроме основного сигнала с антенной установки, получает дополнительные данные с GNSS приёмника временной синхронизации. Дополнительные данные позволяют постоянно, с периодичностью в 1 секунду, подстраивать встроенные часы реального времени устройства с точностью до 150нс для последующего выставления точных меток времени принятого сигнала для его обработки и вычисления орбитальных параметров принятого спутника [5].



а – аппаратная часть блоков управления и обработки



б – аппаратная часть, включённая в блок приема

Рисунок 1 – Прототип станции приема и измерения орбитальных параметров нано- и пико- спутников

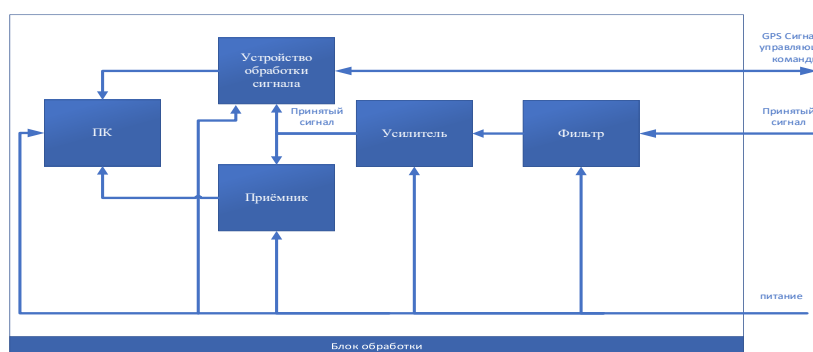


Рисунок 2 – Функциональная схема блока обработки

Результатами проведённой работы стал рабочий прототип станции приема и экспресс анализа орбитальных параметров нано- и пико- спутников с узкой диаграммой направленности антенной установки и высоким отношением сигнал/шум с дополнительной фильтрацией по принимаемым частотам и GNSS приёмником синхронизации для точных временных меток. Успешно проведены тесты приема сигнала с низкоорбитальных университетских нано- и пико- спутников на частоте приема 430-440МГц. Принятые данные и измеренные параметры сигнала накапливаются в собственной базе данных для последующей обработки и качественной оценки работы алгоритмов измерения орбитальных параметров нано- и пико- спутников.

#### Список литературы

1. Kulu E. "Nanosatellite Launch Forecasts - Track Record and Latest Prediction" 36th Annual Small Satellite Conference, Utah State University, Logan, UT, 2022, 17p.
2. Pavel K., Puričar P., and Kovářová K. "Study of the Two-Line Element Accuracy by 1U CubeSat with a GPS Receiver" Sensors 22, no. 8: 2902. <https://doi.org/10.3390/s22082902>
3. Shkelzen Cakaj, "Ground Station Design and Analysis for LEO Satellites: Analytical, Experimental and Simulation Approach" The IEEE, Inc, 2023, 240p. ISBN: 9781119899280
4. Evchik, V. E. Spiridonov, A. A. Ushakov, D. V. "Development of Engineering Models of Nanosatellites for Student Training", Devices and Methods of Measurements (E-Journal), 2022, p 172-179. <http://doi.org/10.21122/2220-9506-2022-13-3-172-179>
5. Spiridonov A., Saetchnikov V., Ushakov D. "Small Satellite Orbit Determination Methods Based on the Doppler Measurements by Belarusian State University Ground Station". IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, vol. 2, no. 2, pp. 59-66, June 2021 <http://doi.org/10.1109/JMASS.2020.3047456>

УДК 528.88

Зайцева А. П., Топаз А. А., Шестаков Н. А.

## **МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ ЗАТОПЛЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе рассмотрены методы выявления зон затоплений на основе использования космических снимков для мониторинга таких чрезвычайных ситуаций, как затопления территории. По данным Белорусского космического аппарата исследовано обнаружение изменений на затопляемой территории в период половодья.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время являются неотъемлемой составляющей исходной информации прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций. Одним из направлений такого мониторинга является выявление и картографирование зон затоплений по материалам ДЗЗ.

Цель исследования заключалась в выявлении зон затоплений в период половодья и обнаружении изменений на данных территориях на основе использования спутниковых данных Белорусского космического аппарата (БКА).

В качестве изучаемой территории был выбран участок долины реки Припять вблизи г. Петриков (Гомельская область, Петриковский район). Стоит отметить, что половодье на Припяти ежегодно формируется весной в результате снеготаяния и выпадения дождей при снеготаянии.

Как известно, водные объекты сравнительно легко дешифрируются по снимкам оптического диапазона, поскольку водная поверхность имеет уникальные спектральные свойства, позволяющие легко отличить ее от других видов поверхностей. В ближнем и в среднем инфракрасных диапазонах спектра вода поглощает свыше 90% солнечного излучения, поэтому на снимках в соответствующих каналах водные объекты являются наиболее темными. Также водная поверхность является одним из немногих объектов, имеющих устойчиво отрицательные значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Речная сеть (крупные и средние реки) легко дешифрируется на снимках в синтезе SWIR-NIR-RED на основе вышеописанных свойств воды.

По данным двух разновременных снимков БКА (до и во время половодья) необходимо было определить масштабы затопления прилегающей к Припяти территории. Космические снимки датированы 22 марта и 25 апреля 2014 года.

Первым способом, который был использован для отображения водной поверхности на данных снимках, был нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI. Индекс определяет значения от -1,0 до 1,0. Благодаря особенности отражения в красной и ближней ИК-областях спектра, классы поверхности Земли, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение индекса, что позволяет использовать этот индекс для их идентификации. Облачность, снежный покров и водная поверхность имеют отрицательные значения индекса, а обнаженная почва без растительности и различные горные породы – значения, близкие к нулю.

В качестве следующего способа выявления водной поверхности на снимках был выбран Модуль SPEAR Lines of Communication (LOC) – Water, который используется для получения векторного представления водных каналов, которые могут быть частично скрыты, например, густой растительностью. Нормализованный разностный индекс воды NDWI рассчитывается с использованием комбинации GREEN-NIR (видимый зеленый и ближний инфракрасный), что позволяет выявлять незначительные изменения содержания воды в водоемах.



В третьем способе по результатам автономной классификации с помощью алгоритма ISODATA было определено количество классов, соответствующих водной поверхности. После процедуры классификации эти классы были объединены, а классы, не соответствующие водной поверхности, были удалены.

Аналогичный результат можно получить посредством инструмента «классификация с обучением». Для этого в качестве обучающей выборки необходимо нанести области интереса (ROI) на область водной поверхности (русло или затопленные территории). Далее с помощью инструмента Классификация параллелепипеда (Parallelepiped Classification) производится обработка данных.

Для сравнения полученных результатов был применен инструмент *обнаружения изменений*, позволяющий картографировать места затоплений. Для этого были выбрано количество классов – 3, что означает наличие положительных и отрицательных изменений (в данном случае наступление и отступление воды), а также территорий, не подвергшихся изменениям (рисунок 1).

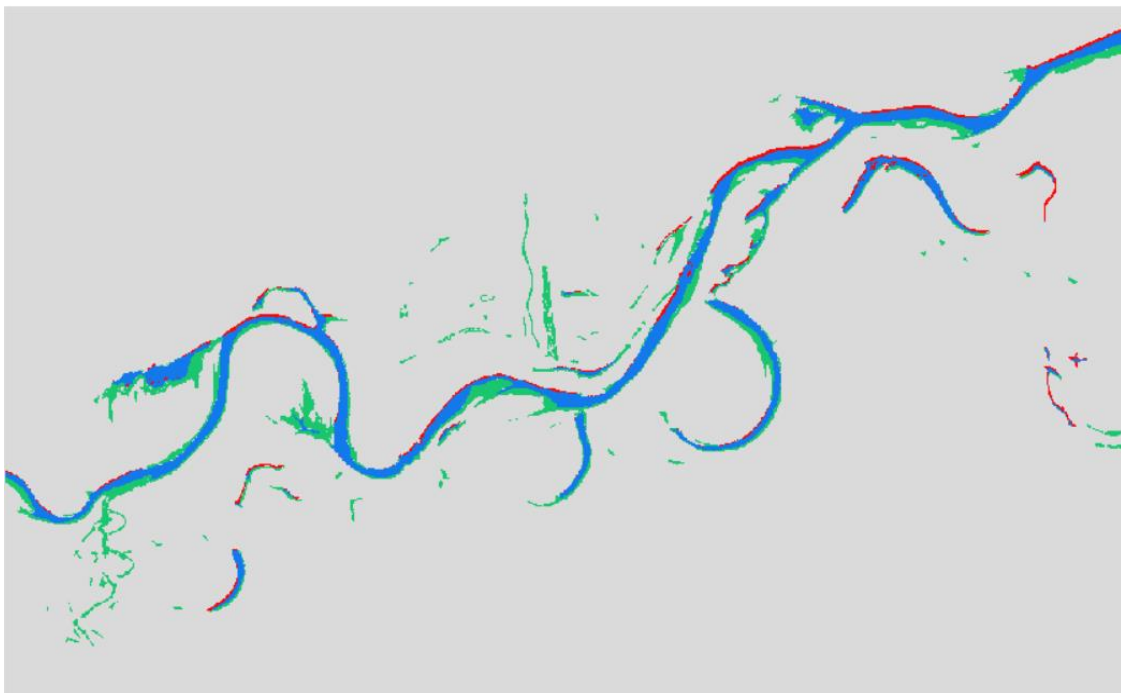


Рисунок 1 – Результат применения инструмента обнаружения изменений  
Серый цвет – территория без изменений; красный цвет – территория, где вода отступила;  
зеленый цвет – территория, где вода появилась

Таким образом, в ходе выполнения исследования были опробованы способы отображения водной поверхности, а также обнаружения изменений на затопляемой в период половодья территории посредством обработки разновременных космических снимков в программном комплексе ENVI. Способ обнаружения изменений в данном случае можно отнести к промежуточным результатам цифровой обработки, на основе которой может быть получена карта-схема зон затоплений исследуемой территории.

#### Список литературы

1. ENVI 5.1. Руководство пользователя. – Москва: Компания «Совзонд». – 2014. – 242 с.
2. Топаз, А. А. Цифровая обработка космических снимков в программном комплексе ENVI: учеб.-метод. пособие / А. А. Топаз, Е. В. Казяк. – Минск: БГУ, 2018. – 79 с.

УДК 681.7

Ивуть П. В., Ломако А. А., Голубев Ю. В., Хомицевич А. Д., Сосенко В. А.

## СТАЦИОНАРНЫЙ БЛОК СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЪЁМКИ НА БАЗЕ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

На сегодняшний день одним из способов калибровки спутниковых систем является полетная калибровка по специальным наземным полигонам. В качестве таких полигонов зачастую используется международная сеть для радиометрических калибровок RedCalNet. В настоящее время на территории СНГ нет полигонов, входящих в эту сеть. В то же время, на орбите работают Белорусский космический аппарат и российско-белорусская группировка спутников «Канопус». В данной работе представлен комплекс аппаратуры, являющийся средством мониторинга состояния подстилающих поверхностей в наземных условиях, позволяющий осуществлять регистрацию спектральных отражательных характеристик объектов с высокой частотой, а также с высоким пространственным и спектральным разрешением.

Гиперспектральные системы (ГСС) достаточно широко используются при дистанционном зондировании Земли с различных носителей, а также при наземных и полетных калибровках авиакосмических систем. Разработанная аппаратура ГСС имеет свои новые элементы формирования гиперспектральных изображений в диапазоне 400 – 900 нм.

Изделие предназначено для решения задач полетной калибровки спутниковых сенсоров и валидации спутниковых измерений, создания спектральных баз данных коэффициентов отражения природных и искусственных объектов для решения задач диагностики и мониторинга состояния объектов на поверхности Земли.

Блок спектральной съемки, производящий регулярные измерения спектров отражения одних и тех же природных и искусственных эталонных площадок, обеспечивает получение данных для калибровки спутниковых сенсоров и валидации решения задач космического мониторинга территорий Беларуси с частотой не ниже 1 раза в сутки.

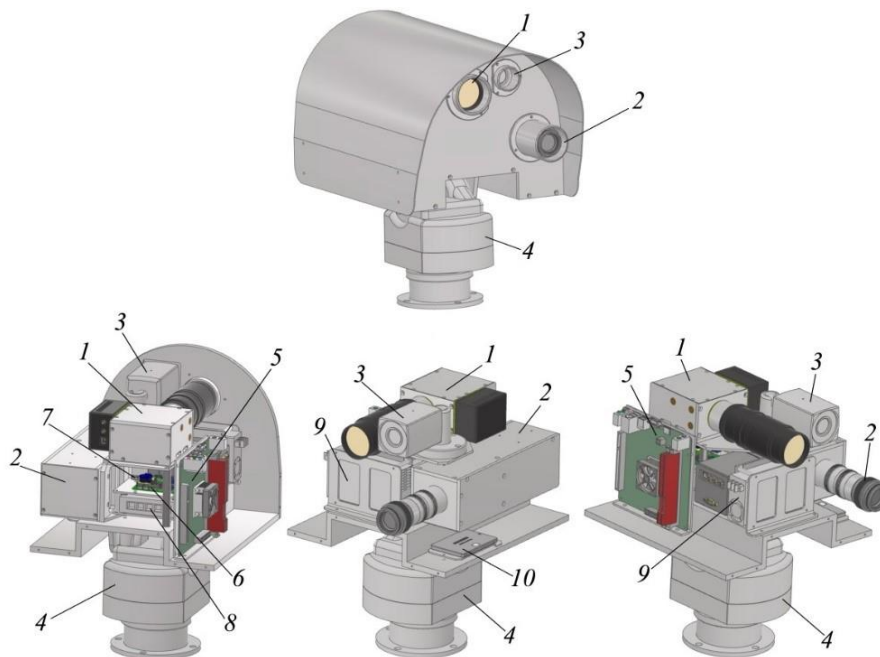


Рисунок 1 – Внешний вид и состав БСС

1 - ГСС; 2 - ШСР; 3 - ВН; 4 - СНС; 5 - управляющий компьютер; 6 - контроллер управления; 7 - датчик метео; 8 - коммутатор Ethernet; 9 - блок питания; 10 - SSD-накопитель.

В состав блока спектральной съёмки (рисунок 1) – входят следующие модули: гиперспектральная система (ГСС); широкодиапазонный спектро радиометр (ШСР); видеокамера наведения (ВН); система наведения и сканирования по азимуту и углу вертикальной плоскости (СНС); управляющий компьютер; контроллер управления; датчик метеопараметров; коммутатор Ethernet; блок питания; SSD-накопитель.

ГСС обеспечивает получение спектральной плотности энергетической яркости объектов в диапазоне 400 - 900 нм и состоит из входного объектива, узла входной щели, полихроматора, приемной матрицы. В состав полихроматора входит вогнутая отражательная голографическая дифракционная решетка, формирующая изображение входной щели в плоскости фотоприемника (ПЗС-матрицы). Решетка выполняет функции коллиматора, диспергирующего элемента и камерного объектива одновременно. Размер и количество чувствительных элементов приемной ПЗС матрицы в направлении дисперсии полихроматора определяют ширину, число и локализацию спектральных рабочих интервалов. Число и размер пикселей матрицы в перпендикулярном направлении определяет размер полосы пространственного спектрометрирования и пространственное разрешение. Число приемных элементов матрицы  $2044 \times 2044$ , с размером элемента  $5,0 \times 5,0$  мкм.

Широкодиапазонный спектро радиометр (ШСР), обеспечивает получение и регистрацию спектров отражения природных и антропогенных объектов в диапазоне 900-2500 нм и состоит из входного объектива, полихроматора, линейчатого приемника излучения InGaAS G9208-256W с числом приемных элементов 256, размером элемента  $50 \times 250$  мкм, со скоростью съёмки 5 кадров в секунду.

Цифровая цветная видеокамера наведения предназначена для привязки гиперспектральных данных к тестовым объектам съёмки.

СНС обеспечивает поворот оптических осей ГСС, ШСР и ВН в плоскостях:

- в горизонтальной плоскости (по азимуту) до  $350^\circ$ ;
- в вертикальной плоскости на угол до  $35^\circ$ .

Скорость сканирования и точность наведения СНС по азимуту и углу вертикальной плоскости соответствуют пространственно-временным характеристикам ГСС и ШСР.

Для управления и контроля ГСС разработан программный комплекс (ПК), состоящий из ряда взаимосвязанных компонентов: модуля управления спектро радиометрами; модуля управления метеоблоком; модуля управления СНС по азимуту и углу вертикальной плоскости; модуля управления и сбора данных ВН; модуля контроля текущего состояния системы. Особенностью компонентов, отвечающих за взаимодействие с метеоблоком и СНС, является использование специального протокола связи управляющего компьютера с микроконтроллером через СОМ-порт, разработанного в ходе данной работы.

Для получения необходимых выходных данных всего программного комплекса существует итеративный алгоритм выполнения съёмки. В результате выполнения одной итерации регистрируется один спектр отражения ШСР, одна строка ГСС, одно изображение ВН. Данные связываются по временным меткам в именах файлов. Все данные, регистрируемые различными модулями ПК, можно представить в привязке к данным ВН.

Программный комплекс реализован на языке программирования C++ с использованием фреймворка Qt. В целях оптимизации работы программы были использованы возможности языка программирования и фреймворка – разделение процессов регистрации и сохранения данных различными сенсорами на связанные с использованием слот-сигнальной системы потоки. За счет этого удается ускорить процесс получения данных.

### **Заключение**

Расчеты и первые тестовые включения аппаратуры показывают, что разработанный блок спектральной съёмки, производящий в автоматическом режиме регулярные измерения спектров отражения, должен позволить осуществлять полетные калибровки спутниковых сенсоров с высокой частотой. Это может существенно увеличить уровень валидности данных, регистрируемых спутниковыми системами (в том числе, БКА, Канопус-В).

UDC 528.8

Kolchevsky N. N.<sup>1</sup>, Dudchik Yu. I.<sup>1</sup>, Kolchevskay I. N.<sup>1</sup>, Zhukava M. N.<sup>1</sup>

## FLYING MEASURING STATION BASED ON DRONE DJI PHANTOM

<sup>1</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,  
Minsk, Belarus

Measuring systems based on Arduino hardware platform and DJI Phantom 3 quadcopter are proposed. The results of processing of measuring information obtained in a series of flights are described. Processing photo / video material in software packages allows to build maps of the area, to measure distances and heights and to analyze visible objects. A gas analyzer based on MQ series sensors and the results of high-altitude measurements of atmospheric air are considered.

Usage of quadcopters is demanded by many industries: from mapping and high-altitude observations to environmental measurements and creation of measuring devices. One of the promising areas is the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in mapping. Using the flight capabilities of a quadcopter and its camera, allows to obtain very high-quality images and video. Identification of atmospheric impurities has great importance in practice, due to the increasing industrial activity of man. The movement of huge air masses containing gaseous pollution and dust particles contributes to the relatively rapid spread of pollution in the atmosphere. Information about the qualitative and quantitative composition of the air is necessary to determine and predict the degree of air pollution and to carry out environmental protection measures.

On the geobase of BSU "Western Berezina" was performed more than 60 flights with a total duration of about 20 hours, and received 20 GB of photos and video, GPS coordinates, technical files of the flight, recorded with DJI Phantom 3 Advanced quadcopter. The aerial photography of the DJI Phantom 3 Advanced quadcopter was used to create topographic maps and orthophotomaps.

Shooting was made at different altitudes (from 50 to 500 m) and with different illumination (time of day). Analysis of photos and video shows changes in the linear dimensions of the building with a red roof, but the relative positions of reference points and angles remain constant, that indicates the absence of geometric distortions of the onboard camera (Figure 1). Performed a calculation to determine the scale of the obtained images and was obtained a table, on the basis of which you can determine the area of any objects in aerial photography (Figure 2).



Figure 1 – Images obtained at altitudes A) 100 meters, B) 200 meters, C) 300 meters, D) 400 meters

Altitude	Digital scale from print calculation 600dpi	Calculation size 1500x1126 , pixels, m	1 pixel in the image corresponds to the distance on the ground	1 pixel <sup>2</sup> on the image corresponds to the area on the image
100	1: 78	500x370	0,33 meters	0,11 meters <sup>2</sup>
200	1: 310	2000x1500	1,3 meters	1,7 meters <sup>2</sup>
300	1: 400	2600x1900	1,7 meters	2,9 meters <sup>2</sup>
400	1: 470	3000x2300	2,0 meters	4,0 meters <sup>2</sup>

Figure 2 – Table of scales of digital topographic maps

Also, conducted an experiment to determine the lifting power of the quadcopter DJI Phantom 3 Advanced to determine the maximum mass of the cargo - 1.8 kg, from which was selected equipment for the development of measuring stations based on the UAV.

Developed lightweight (weighing less than 200g) measuring stations based on quadcopter DJI Phantom 3 Advanced (Figure 3). The measuring stations were used to monitor air composition at heights of up to 500 meters (troposphere) for the content of gases hazardous to humans. The experimental data are shown in Figures 4a-4b.



Figure 3 – Images of the systems.

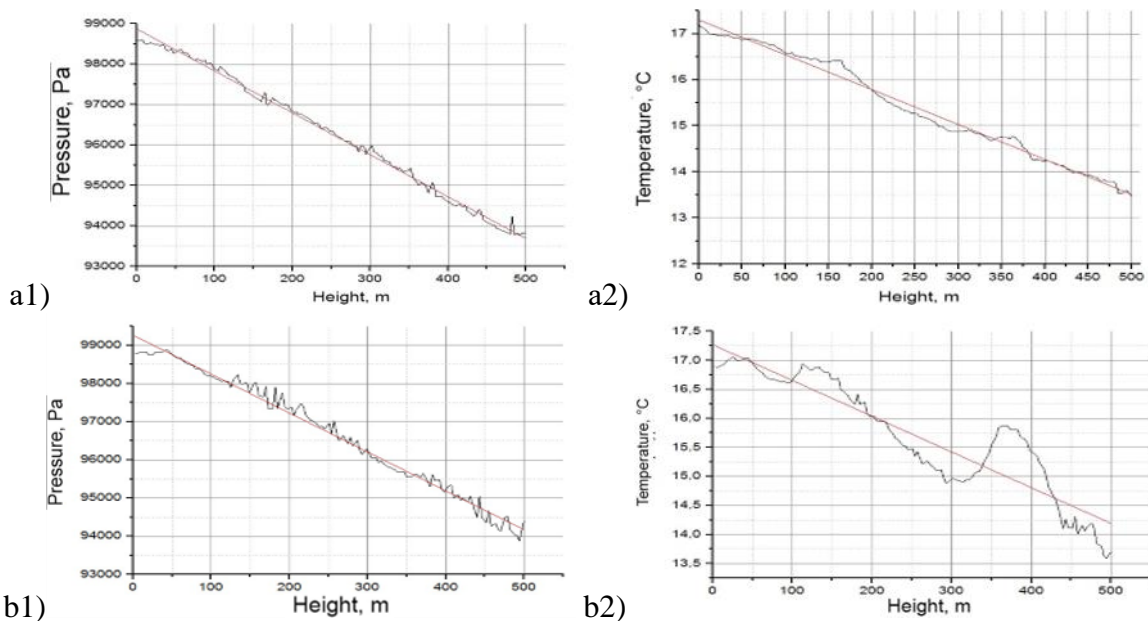


Figure 4 – Plots of measured values of air pressure (a1, b1) and temperature (a2, b2) by the barometer module BMP280. Graphs of measured data when the quadcopter is ascending (a) and when the quadcopter is descending (b).

Also, the software was developed to calculate sensor data from known gas concentrations and to plot the sensitivity characteristics of the sensors. According to the results of the program, it is possible to choose a suitable sensor for measuring the concentration of the required gas. Developed a method and program for determining the concentration of individual gases in the gas mixture under study using a set of sensors from the MQ series.

The introduction of innovative technology and related information resources contributes to the growth of efficiency indicators in various activities. Mobile quadcopters or drones are capable of remote environmental monitoring over a large area. The low cost and price of maintenance compared to manned aviation and traditional ground-based technology increases the importance and relevance of quadcopter-based research.

#### Reference

1. Official website of DJI on the Internet. [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.dji.com>
2. Review of the DJI PHANTOM 3 ADVANCED quadcopter. [Electronic resource]. - Access mode: <https://drongeeek.ru/obzory/dji/phantom-3-advanced>
3. Zulkarnaev V.U., Kamalova V.R. Practical application of unmanned aerial vehicles in the modern world // Innovations in science: coll. of papers on mater. No.4(53) (in Russian) // Innovation in science: article of IVI Intern. Part II. - Novosibirsk: SibAK, 2016. - p. 23-27.

УДК 528.88: 630\*43

Лозин Д. В.<sup>1,2</sup>, Лупян Е. А.<sup>1,2</sup>, Балашов И. В.<sup>1</sup>, Барталев С. А.<sup>1,3</sup>, Стыщенко Ф. В.<sup>1</sup>

## МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ПИРОГЕННОЙ ГИБЕЛИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ПОЖАРОВ

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

Настоящая работа посвящена описанию методики оперативной оценки площадей постпожарных повреждений лесного покрова на основе информации об интенсивности горения пожаров по данным спутникового мониторинга системой MODIS. В качестве меры интенсивности пожара в работе используется радиационная мощность излучения огня (Fire Radiative Power), нормированная на площадь элемента наблюдения (FRPS). В работе предложен подход, позволяющий строить зависимости степени повреждений лесов от значений FRPS. На основе использования полученных зависимостей в работе предложена новая методика оперативной оценки площади пирогенной гибели лесов. Приведены интегральные оценки площадей погибшей от пожаров лесной растительности на территории РФ и Республики Беларусь.

**Введение.** Получение объективной оценки степени повреждения лесов пожарами является важной задачей, актуальность решения которой сильно возросла в последние годы. Это произошло в том числе в связи с проблемами, связанными с мониторингом выбросов углерода в атмосферу, происходящих в результате действия природных и в первую очередь лесных пожаров. [1-3]. В настоящей работе предложена методика оперативной оценки площадей погибшего лесного покрова на основе использования полученных зависимостей. На основе предложенной схемы проведена оценка площадей погибших в различные годы лесов на территории РФ и проведено сравнение данной информации с оценками, полученными на основе сравнения наблюдений до и после пожаров.

**Используемые данные.** В качестве исходных данных об FRP был использован однородный ряд данных о пожарах и горячих точках ЦКП ИКИ-Мониторинг [4], сформированный на основе продукта Collection 6 MODIS Active Fire / Hotspot Data (MCD14DL) [5]. Данные в удобном для анализа формате покрывают территорию РФ с 2001 года по настоящее время и проаннотированы по картам типов территорий, формируемых в ИКИ РАН на каждый год [6]. Следует отметить, что в работе при проведении сопоставления использовалось значение FRP, нормированное на площадь наблюдаемого пиксела (далее, эту величину мы будем называть FRPS). В качестве данных о повреждении лесов для их сопоставления с информацией об FRPS был использован ряд данных с 2006 по 2021 год на территорию РФ, полученный с использованием метода оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS, разработанный в ИКИ РАН [7,8]. Данные представляют собой полигоны повреждений с указанием даты определения и степенью повреждения лесов. Степень повреждения определяется одним из пяти классов средневзвешенной категории состояния (СКС): первый класс – здоровые насаждения, второй – ослабленные, третий – сильно ослабленные, четвертый – усыхающие, пятый – погибшие).

**Анализ связи степени повреждения лесов и FRPS.** Для исследования зависимости между энергетическими характеристиками пожаров и постпожарными повреждениями была разработана методика сопоставления информации о наблюдаемых FRPS с данными об СКС, основанная на использовании постпожарных карт FRPS. Подробно вопросы распределения FRPS для различных типов территорий освещены в [9]. На основе имеющихся результатов сопоставления FRPS и классов СКС лесов была построена зависимость вероятности гибели (наблюдения пятого класса) леса в зависимости от интенсивности горения наблюдавшегося пожара. На рисунке 1 представлены зависимости, полученные при одновременном учете как периода, в который действует пожар, так и преобладающей породы на территории действия

пожара. На наш взгляд именно эти зависимости и следует использовать при построении оперативных оценок гибели лесов от пожаров на основе наблюдения интенсивности горения.

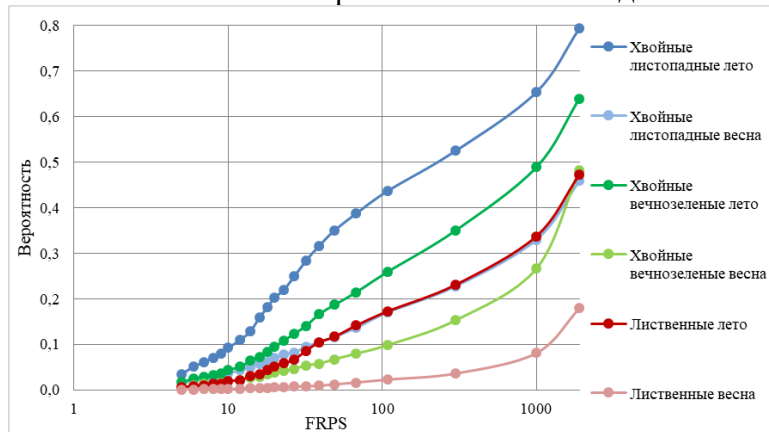


Рисунок 1 – Вероятность гибели леса от интенсивности горения (FRPS) с учетом сезона и групп древесных пород на территории действия пожара (весна – пожары до 15 июня, лето – после; графики сгруппированы по сезонам для визуального восприятия, для технологии оперативной оценки гибели лесов используются кривые, сгруппированные по месяцам)

**Оценки повреждений лесов на основе информации об интенсивности горения.** Используя полученные зависимости вероятности гибели лесов от FRPS с учетом времени действия пожара и группы древесных пород, поврежденного огнем насаждений, можно предложить следующую схему оценки площадей погибших лесов. С использованием постпожарных карт FRPS подсчет площади погибших лесов (лесов, в которых наблюдается 5 класс СКС) производится путем суммирования площади всех точек (пикселей), в которых наблюдался FRPS, умноженных на вероятность гибели леса в конкретном пикселе. Подробно данная методика описана в статье [10]. Полученные таким методом оценки площади погибших лесов на территории РФ достаточно хорошо согласуются с оценками площадей на основе выделения постпожарных повреждений по результатам анализа изменений лесного покрова после пожаров. Это хорошо видно из данных, представленных на рисунке 2.

Разработанная технология оценки площади погибшего от пожаров леса может быть применена на любые территории, для которых ведется спутниковый мониторинг активного горения и существует карта типов растительности. На рисунке 3 представлены оценки площади погибшей лесной растительности на территории Республики Беларусь.

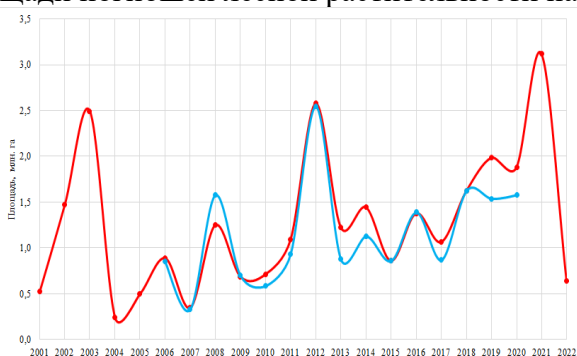


Рисунок 2 – Оценки площади погибших лесов на территории РФ с 2001 по 2022 гг., полученные на основе анализа FRPS (красный график) и метода, основанного на сравнении состояния растительного покрова до и после пожаров, предложенного в [7]. (голубой график, 2006-2020 гг.).

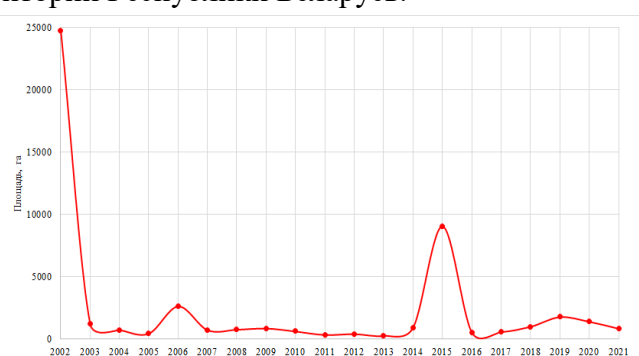


Рисунок 3 – Оценки площади погибших лесов на территории Республики Беларусь с 2002 по 2021 гг.

**Выводы.** В работе на основе анализа наблюдений лесных пожаров на всей территории России за период с 2006 по 2020 гг. получены зависимости вероятности гибели лесов от интенсивности пожаров с учетом как сезонных особенностей, так и типов лесов, в которых

действовал пожар. На основе данных зависимостей в работе предложен метод оценки площадей погибших лесов. Одним из преимуществ предложенного метода является то, что он позволяет делать оперативные оценки гибели лесов не только в момент завершения пожара, но и по мере его развития. При этом проведенное сравнение результатов, получаемых на основе предлагаемого метода, достаточно хорошо согласуется с результатами оценок, получаемых на основе анализа состояния лесного покрова до и после лесного пожара.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8). Работа выполнялась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [4].

#### Список литературы

1. M. J. Wooster, G. Roberts, and G. L. W. Perry Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release // *Journal of geophysical research*, VOL. 110, D24311, doi:10.1029/2005JD006318, 2005
2. Ichoku C. and Y.J. Kaufman A Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements // *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol 43, no. 11, 2005
3. Kaiser, J. W., Heil, A., Andreae, M. O., Benedetti, A., Chubarova, N., Jones, L., Morcrette, J. -J., Razinger, M., Schultz, M. G., Suttie, M., & van der Werf, G. R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power // *Biogeosciences Discussions*, 9, 527–554, 2012
4. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. URL:<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl>
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. // М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
7. Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS. 2013. Т.10. № 1. С. 254-266.
8. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // *Лесоведение*, 2015 №2 С.83-94
9. Лозин Д.В., Балашов И.В. Анализ особенностей распределений наблюдаемого FRP для пожаров различных типов территорий и антропогенных объектов. // М.: ИКИ РАН, 2019. С.102. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
10. Лупян Е.А., Лозин Д.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Исследование зависимости степени повреждений лесов пожарами от интенсивности горения по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 3. С. 217-232 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-217-232



## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Исследование лесных территорий с использованием данных беспилотных летательных аппаратов на сегодняшний день является одним из наиболее доступных способов мониторинга параметров древостоев. Для изучения параметров отдельных деревьев в зависимости от времени важной является точная географическая привязка регистрируемых фотоизображений. В работе предлагается способ уточнения геопривязки аэрофото-снимков за счет применения к фотоизображениям с географически привязанными центрами алгоритмов библиотеки компьютерного зрения. В результате применения разработанного способа удалось достичь уменьшения среднего радиуса разброса координат древостоев при геопривязке на 46%.

В современном мире использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для исследования объектов поверхности Земли с малых высот является одним из способов анализа последствий чрезвычайных ситуаций [1], оценки состояния растительного покрова в пустынях [2], прогнозирования урожайности в сельском хозяйстве [3] и др. Для большинства задач существует необходимость сшивки всех зарегистрированных с помощью БПЛА данных в единое географически привязанное изображение. Географическую привязку обеспечивают входящие в состав БПЛА приемники радионавигационных сигналов. Сшивка данных, как правило, осуществляется с использованием дополнительного программного обеспечения.

Для построения ортофотопланов используются различные подходы. Один из них основан на поиске на объединяемых изображениях специфических областей – особых точек, последующем их сопоставлении и определении относительного смещения изображений на основе полученной информации [4]. Такой подход хорошо работает при трассовой съемке, однако при съемке методом параллельного галсирования изображения, полученные на близлежащих галсах полета БПЛА, могут быть смещены вследствие накопления ошибок, вызванных внешними факторами (например, наличием ветра при съемке лесной территории). Зачастую фотоизображения БПЛА в качестве географической привязки обладают координатами лишь центров кадров. В случае, когда при аэрофотосъемке не используются RTK-системы (Real Time Kinematic), точность такой геопривязки данных достаточно низка. Целью данного исследования стала разработка способа повышения точности географической привязки изображений, получаемых с использованием БПЛА мультироторного типа, обладающего камерой видимого диапазона и приемником сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), без учета поправок, вносимых RTK-системами.

Для решения задачи уточнения географической привязки изображений земной поверхности было принято решение в данном исследовании применить подход, где основополагающим будет использование одновременно и GPS-координат, соответствующих отдельным изображениям, и пиксельных смещений между изображениями, вычисленных на основе анализа особых точек в изображениях. Исследование проводилось на примере данных, зарегистрированных БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral с высоты 100 м над поверхностью Земли. Данные были получены в ходе летного эксперимента, проведенного 06.10.2022-11.10.2022 на территории учебно-географической станции БГУ «Западная Березина». Большую часть зарегистрированных объектов составляли древостои различных пород, определение координат которых являлось приоритетной задачей. Описываемые в работе алгоритмы получили реализацию в качестве составных частей программного обеспечения (ПО), разработанного с помощью фреймворка Qt на языке программирования C++ с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

Важно отметить, что описанная выше задача, вообще говоря, не имеет единственного решения при проведении аэрофотосъемки территории лесного массива с предельно низких высот. Это обусловлено существенным различием высоты объектов на регистрируемых изображениях, что приводит к фактическим различиям в линейном пространственном разрешении на пиксель аэрофотосистем в разных зонах отдельных кадров (рисунок 1).

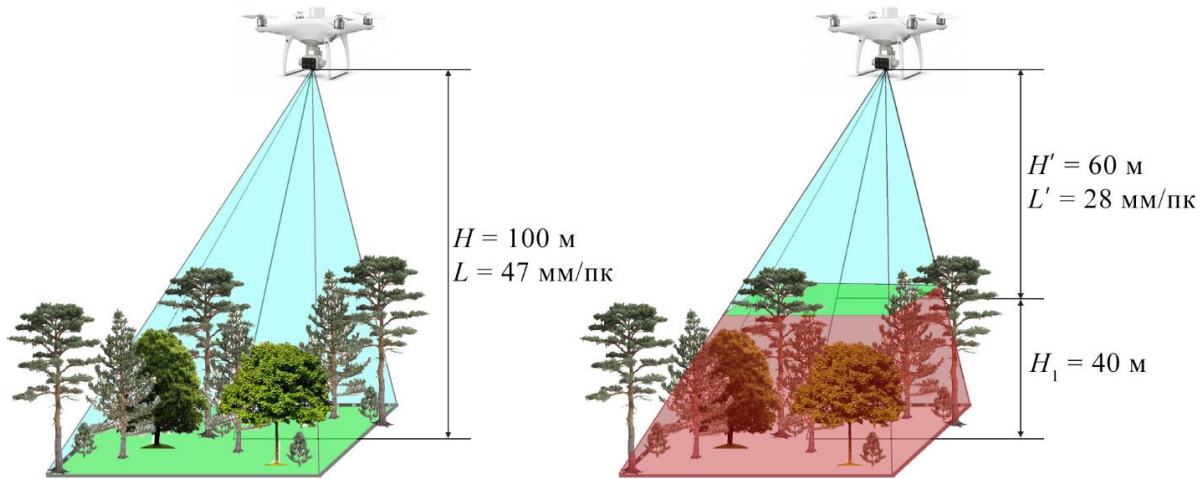


Рисунок 1 – Различия в линейном пространственном разрешении ( $L$ ) при съемке разновысотных объектов

Для корректного определения географических координат изображений в работе использовался адаптивный подход, основанный на поиске коэффициентов масштабирования близлежащих изображений. Коэффициенты масштабирования определялись как соотношения пиксельных смещений между изображениями, вычисленных на основе данных ГНСС-приемника и на основе расстояния между особыми точками, детектированными с использованием алгоритмов библиотеки компьютерного зрения:

$$S = \frac{\Delta r_g}{\Delta r_p}, \quad (1)$$

где  $\Delta r_g$  – пиксельное расстояние между центрами близлежащих кадров, рассчитанное на основе базовой геопривязки аэрофотоснимков;  $\Delta r_p$  – пиксельное расстояние между центрами близлежащих кадров, рассчитанное на основе координат особых точек в аэрофотоснимках (в обоих случаях пиксельное расстояние определяется по формуле  $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ ).

В качестве алгоритмов работы с особыми точками в исследовании использовалось сочетание детектора ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) и дескриптора FREAK (Fast Retinal Key-point) с сопоставлением дескрипторов особых точек полным перебором с метрикой сравнения Хэмминга [5], так как для данных БПЛА такой вариант демонстрирует наилучшие показатели по качеству шивки среди исследованных методов [4]. Перед проведением поиска особых точек для всего набора изображений необходимо проведение коррекции искажений на изображениях, вызываемых эффектом дисторсии. Такая коррекция осуществлялась в работе на основе лабораторного эксперимента по определению коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии по методике, описанной в [4]. Пересчет координат изображений из географических в пиксельные (и обратно), а также поворот и линейное смещение системы координат проводились с использованием существующих методов пересчета на основе экспериментально определенного углового пространственного разрешения съемочной системы по методике, аналогичной описанной в [6].

После расчета по формуле (1) коэффициентов масштабирования для каждого кадра проведенного эксперимента также рассчитывалось дополнительное линейное смещение по осям изображения с целью компенсировать неточность определения географических координат. Эти смещения рассчитывались по следующим формулам:

$$\begin{cases} \Delta x^{i,j} = \frac{1}{2}(\Delta x_g^{i+1,j} + \Delta x_g^{i-1,j}) - \left[ \frac{1}{2}(S^{i+1,j} + S^{i,j}) \cdot \Delta x_p^{i+1,j} + \frac{1}{2}(S^{i-1,j} + S^{i,j}) \cdot \Delta x_p^{i-1,j} \right] \\ \Delta y^{i,j} = \frac{1}{2}(\Delta y_g^{i,j+1} + \Delta y_g^{i,j-1}) - \left[ \frac{1}{2}(S^{i,j+1} + S^{i,j}) \cdot \Delta y_p^{i,j+1} + \frac{1}{2}(S^{i,j-1} + S^{i,j}) \cdot \Delta y_p^{i,j-1} \right] \end{cases}$$

где  $i$  – номер строки изображения в серии;  $j$  – номер столбца изображения в серии.

В ходе проведенного летного эксперимента одна и та же территория лесного массива была зарегистрирована шестикратно. В результате аэрофотосъемок были получены по 100 изображений в каждой части эксперимента. Геопривязка данных была произведена несколькими способами: прямым наложением изображений на координатную сетку в соответствии с исходными координатами центров кадров; разработанным в ходе исследования способом; с помощью стандартного ПО для обработки данных, предоставляемого на платной основе компанией DJI. В сериях снимков определялись одни и те же деревья, фиксировались их географические координаты. После этого определялся разброс значений координат деревьев в сериях изображений. Средний радиус разброса значений географических координат составил при прямом наложении изображений 2,48 м; при использовании разработанного способа – 1,35 м; при использовании стандартного ПО – 1,58 м.

#### Заключение

В данном исследовании был разработан способ повышения точности географической привязки аэрофотоснимков, полученных со сверхмалых высот с использованием БПЛА. Повышение точности при использовании нового способа по сравнению с прямым наложением по координатам составляет в среднем 46% (уменьшение радиуса разброса координат относительно их математического ожидания на 1,13 м). За счет использования параллельных вычислений в разработанных программных модулях удалось ускорить обработку данных в сравнении со стандартным ПО более, чем в 3 раза.

#### Список литературы

1. Takhtkeshha, N.; Mohammadzadeh, A.; Salehi, B. A Rapid Self-Supervised Deep-Learning-Based Method for Post-Earthquake Damage Detection Using UAV Data (Case Study: Sarpol-e Zahab, Iran). *Remote Sens.* 2023, 15, 123. DOI: 10.3390/rs15010123.
2. He, J.; Lyu, D.; He, L.; Zhang, Y.; Xu, X.; Yi, H.; Tian, Q.; Liu, B.; Zhang, X. Combining Object-Oriented and Deep Learning Methods to Estimate Photosynthetic and Non-Photosynthetic Vegetation Cover in the Desert from Unmanned Aerial Vehicle Images with Consideration of Shadows. *Remote Sens.* 2023, 15, 105. <https://doi.org/10.3390/rs15010105>.
3. Guo, Y.; Zhang, X.; Chen, S.; Wang, H.; Jayavelu, S.; Cammarano, D.; Fu, Y. Integrated UAV-Based Multi-Source Data for Predicting Maize Grain Yield Using Machine Learning Approaches. *Remote Sens.* 2022, 14, 6290. <https://doi.org/10.3390/rs14246290>.
4. Ломако А. А. Метод формирования панорамных изображений по мультиспектральным данным беспилотного летательного аппарата, учитывающий дисторсию камеры. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2022;2:00–00. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-2-60-69>.
5. Кэлер А., Брэдски Г. Изучаем OpenCV 3. Слинкин А. А., переводчик; Мовчан Д., редактор. Москва: ДМК Пресс, 2017. С. 418– 578.
6. A. A. Lamaka, A. V. Gutarau, N. G. Shcherbakou, P. V. Ivuts. Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle. *Devices and Methods of Measurements.* 2023, vol. 14, no. 1, pp. 7–17. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17.

УДК 528.71

Ломако А. А., Ивуть П. В., Гуторов А. В., Щербаков Н. Г.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ АЭРОФОТОСИСТЕМ В ЛЕТНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты являются важным источником данных при дистанционном зондировании Земли. Для корректной обработки изображений, регистрируемых с использованием дронов, важно знать пространственное разрешение камеры, осуществляющей съемку. В работе предлагается методика оценки пространственного разрешения аэрофотосистем в летном эксперименте на основе регистрации мультиспектральных изображений штриховой миры. В результате применения методики выявлены различия в разрешающей способности каналов камеры до 11%.

В современном мире для исследований отражательных характеристик объектов на поверхности Земли широко используются изображения, зарегистрированные с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Для большинства задач существует необходимость сшивки всех зарегистрированных с помощью БПЛА данных в единое географически привязанное изображение, что требует перехода от географических координат к пиксельным. Чтобы осуществить такой переход, важно знать высоту съемки и пространственное разрешение камеры, установленной на БПЛА.

Существует методика, описывающая вариант решения задачи определения пространственного разрешения по результатам летного эксперимента [2]. Однако данная методика не описывает требования к мирам для определения пространственного разрешения и позволяет определять только линейное разрешение системы без оценки неопределенностей. Кроме того, существуют государственные стандарты, описывающие методы определения разрешающей способности и отдельные аспекты фотограмметрии, которые можно использовать. В то же время, важно разделить такие понятия как разрешение камеры и ее разрешающую способность.

Под линейным разрешением камеры стоит понимать величину, характеризующую длину (в метрах) части объекта, проекция которой приходится на пиксель матрицы. Это параметр, который необходим для корректного преобразования географических координат изображений в пиксельные при формировании ортофотопланов. Угловая разрешающая способность – это величина, характеризующая возможность распознавания близлежащих контрастных объектов на изображениях, зарегистрированных камерой. При этом экспериментальная угловая разрешающая способность систем зачастую довольно существенно может отличаться от теоретически рассчитанной [3].

Целью данной работы стала разработка подхода для формирования методики определения линейного пространственного разрешения и угловой разрешающей способности на пиксель аэрофотосистем. Отработка методики проводилась на данных, полученных с использованием БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral.

Теоретическое линейное разрешение на пиксель ( $L_0$ ) может быть рассчитано по формуле:

$$L_0 = \frac{H}{f} \cdot \delta_{px}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота съемки относительно поверхности;  $f$  – фокусное расстояние объектива камеры;  $\delta_{px}$  – физический размер пикселя матрицы камеры, м.

В настоящей работе мира для определения разрешения состоит из набора групп штрихов различной частоты. Каждая группа состоит из пяти светлых, равных по ширине параллельных штрихов на темном фоне. Ширина промежутка между штрихами должна быть равна

ширине штриха. Отношение длины к ширине штрихов постоянно и равно 10. При этом ширина штрихов мира должна убывать от предыдущей группы к последующей по геометрической прогрессии со знаменателем 0,91. Мира должна быть спроектирована таким образом, чтобы рассчитанное по формуле (1) значение  $L_0$  было больше минимального расстояния между чередующимися штрихами мира и меньше максимального расстояния между чередующимися штрихами как минимум вдвое (формула (1) представляет собой грубую оценку снизу пространственного разрешения камер, поэтому теоретическое значение линейного разрешения может существенно отличаться от экспериментально полученной разрешающей способности). В данной работе была спроектирована мира из 13 групп штрихов с шириной штриха от 32 до 100 мм (рисунок 1).

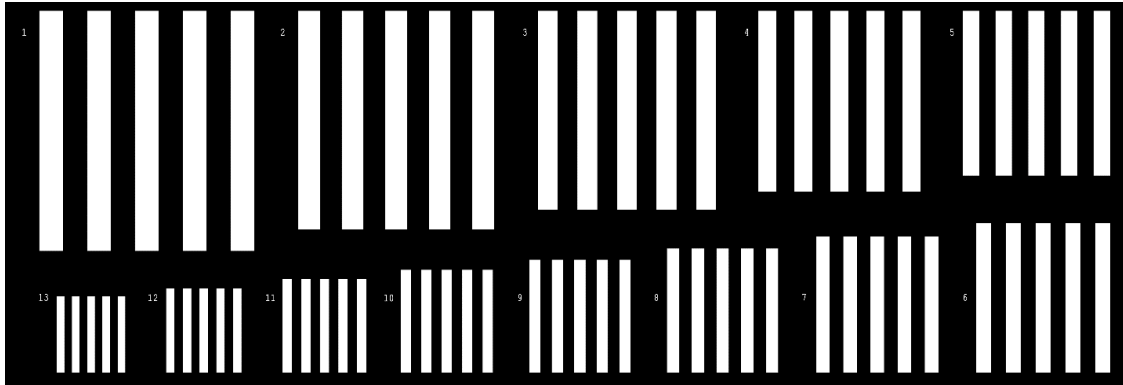


Рисунок 1 – Общий вид мира для определения пространственного разрешения камер аэрофотосистем

Эксперимент по определению пространственного разрешения обзорных камер должен проходить при отсутствии объектов, затеняющих поверхность участка измерений [2]. Проверка и измерение пространственного разрешения выполняется по не менее чем 20 изображениям штриховой мира для каждой высоты съемки. В анализе изображений рекомендуется участие 4 независимых дешифровщиков. Статистическую обработку результатов рекомендуется производить на основе государственных стандартов в области оценки лабораторных измерений.

Для определения экспериментальной угловой разрешающей способности ( $\theta$ ) выделяются группы штрихов, в которых все штрихи различаются по всей их длине. Разрешающая способность камер рассчитывается по формуле:

$$\theta = \arctg \frac{l_{iu}}{H} \cdot \frac{180}{\pi},$$

где  $l_{iu}$  – ширина штриха мира, относящегося к наименьшей группе штрихов, распознанной дешифровщиком.

Для определения линейного разрешения на пиксель необходимо на зарегистрированном изображении мира определить расстояние в пикселях между левым и правым краем наибольшей группы штрихов. В таком случае линейное разрешение для заданной высоты съемки можно рассчитать по формуле:

$$L = \frac{9l_{iu}^{\max}}{N} \cdot H,$$

где  $l_{iu}^{\max}$  – ширина штриха мира, относящегося к наибольшей группе штрихов мира;  $N$  – количество пикселей в изображении, расположенных между левым и правым краем наибольшей группы штрихов.

Для определения искомых величин был проведен летный эксперимент, в результате которого было зарегистрировано 35 мультиспектральных изображений разработанной мира с высоты 100 м относительно поверхности Земли. По итогам оценки линейного разрешения на пиксель камеры DJI Phantom 4 Multispectral определено, что оно остается неизменным для

всех спектральных каналов, и для высоты 100 м составляет 47,3 мм/пк со среднеквадратическим отклонением  $\sigma = 0,14$  мм/пк. Результаты экспериментального определения угловой разрешающей способности камеры представлены в таблице 1. Важно отметить, что значения угловой разрешающей способности мультиспектральной камеры в разных спектральных каналах могут существенно отличаться как от теоретического значения (в данном случае  $\theta_0 = 0,025^\circ$ ), так и по отношению к другим каналам (рисунок 2).

Таблица 1

Экспериментальные оценки углового пространственного разрешения в каналах камеры

RGB изоб- ражения		Синий ( $450 \pm 16$ нм)		Зеленый ( $560 \pm 16$ нм)		Красный ( $650 \pm 16$ нм)		Красный край ( $730 \pm 16$ нм)		Ближний ин- фракрасный ( $840 \pm 26$ нм)	
$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$\sigma, ^\circ$
0,0419	0,0020	0,0457	0,0025	0,0446	0,0026	0,0407	0,0025	0,0460	0,0017	0,0455	0,0024

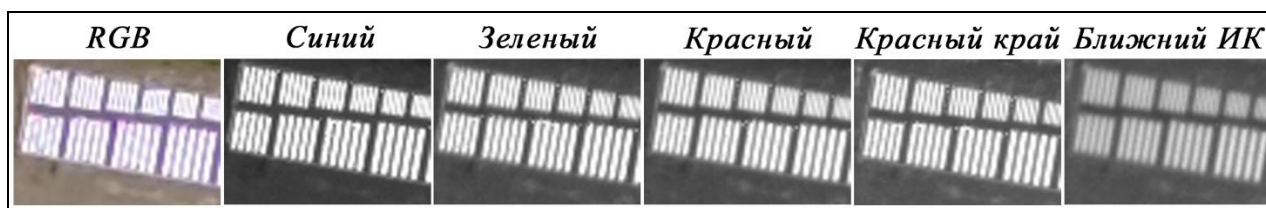


Рисунок 2 – Результаты съемки мира с высоты 100 м в различных каналах мультиспектральной камеры

### Заключение

В настоящей работе был выработан подход к формированию методики определения линейного пространственного разрешения и угловой разрешающей способности на пиксель аэрофотосистем. Работоспособность подхода была проверена в ходе летных экспериментов, в результате которых были получены оценки линейного разрешения и угловой разрешающей способности камеры DJI Phantom 4 Multispectral. Это позволило выявить, что относительные различия экспериментально полученных величин в каналах камеры достигают 11%. Общую разрешающую способность камеры следует считать равной наименьшей величине среди всех каналов (в данном случае – 0,046 градуса). Важно отметить, что экспериментально определенные величины существенно отличаются от теоретически рассчитанных (относительная разность составила до 46%). Уточнение теоретического расчета возможно за счет учета площади, диаметра и пропускания входного объектива, удельной обнаружительной способности фотоприемника.

### Список литературы

1. Lu H., Fan T., Ghimire P., Deng L. Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. Remote Sens. 2020, no. 12(16), 2542. DOI: 10.3390/rs12162542.
2. Молчанов А. С. Методика оценки линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем военного назначения при проведении летных испытаний. Изв. вузов «Геодезия и аэрофото-съемка». – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 390–396. DOI 10.30533/0536-101X-2018-62-4-390-396.
3. A. A. Lamaka, A. V. Gutarau, N. G. Shcherbakou, P. V. Ivuts. Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle. Devices and Methods of Measurements. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 7–17. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17.

УДК 681.785.554

Малышев В. Б.<sup>1</sup>, Фомин Б. Н.<sup>1</sup>, Беляев Ю. В.<sup>2</sup>, Гуляева С. И.<sup>2</sup>

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАНДШАФТОВ ВУЛКАНА КСУДАЧ, ЮЖНАЯ КАМЧАТКА

<sup>1</sup> Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ,  
Минск, Беларусь

В работе представлены результаты экспериментальных комплексных исследований элементов ландшафтов их спектральных характеристик с комплексным описанием объектов подстилающей поверхности вулкана Ксудач, южная Камчатка, для целей создания обучающей выборки спектральных характеристик поверхностей природных ландшафтов для объектно-ландшафтного дешифрирования космических гиперспектральных данных вулканически активных зон Исследования проводились комплексной экспедицией ИГ РАН, ИМГиГ ДВО РАН и НИИПФП им. А.Н. Севченко, БГУ по программе Союзного государства «Мониторинг- СГ» в рамках проекта ИГ РАН СЧ НИР «Мониторинг- СГ 1.3.1.2». Спектральные измерения проводились фотоспектрометриром (ФСР), разработанным в отделе аэрокосмических исследований НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ (г. Минск, Республика Беларусь). Исходные полевые данные загружены в Базу Спектральных Эталонов по адресу: <http://spectral.igras.ru>.

Первые спектральные измерения проводились фотоспектрометриром (ФСР) [1] на эрозионной площадке (водораздел рек Западная Ходутка – Теплая, высота 196 м). Порода площадок: уплотненная тефра вулкана Ксудач, представленная грубым пеплом и лапилли. Растительность: мохово-лишайниковое сообщество с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др) при различном проективном покрытии от 65% до 25% и различном сочетании видов и родов. На рисунке 1 приведены фотоизображения 10 тестовых, площадок на которых проводились спектральные измерения.

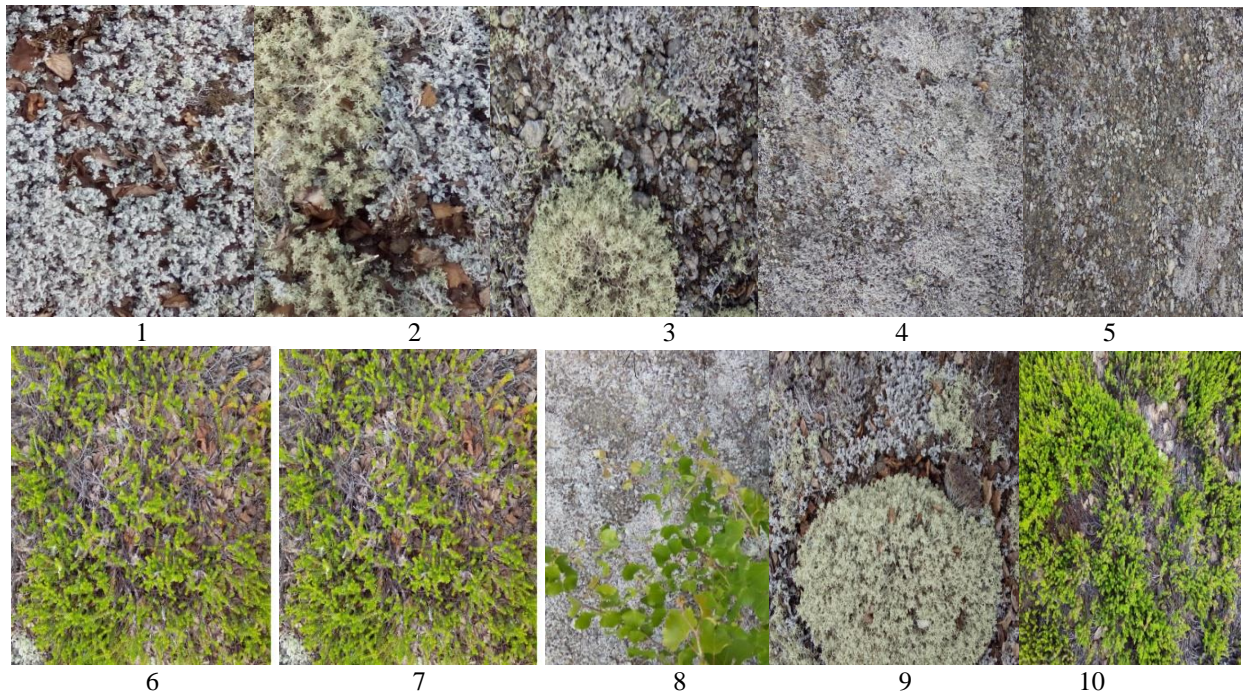


Рисунок 1 – Фотоизображения тестовых, площадок

На рисунке 2 приведены кривые спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) всех 10 тестовых площадок. Спектры пересчитывались в абсолютные единицы СПЭЯ и корректировались вторые порядки ФСР [2].

Секция 5. Аэрокосмические исследования и технологии ДЗЗ

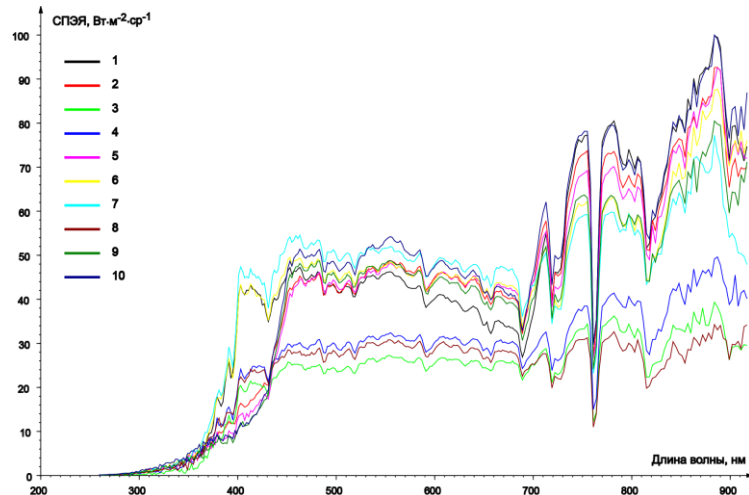


Рисунок 2 – Кривые спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) 10 тестовых площадок.

Следующие 5 тестовых площадок также выбирались на склоне вулкана Ксудач с уплотненной тефрой, представленной грубым пеплом и лапилли. Растительность на площадках представлена шикшевым сообществом (*Empetrum nigrum*). Фенофаза: вегетация до цветения, начало цветения. Проективное покрытие от 65 % до – 85. Также измерения проводились на площадке с молодыми кустами *Betula ermanii* (5 площадка).

На рисунке 3 приведены фотоизображения 5 тестовых площадок на которых проводились спектральные измерения.

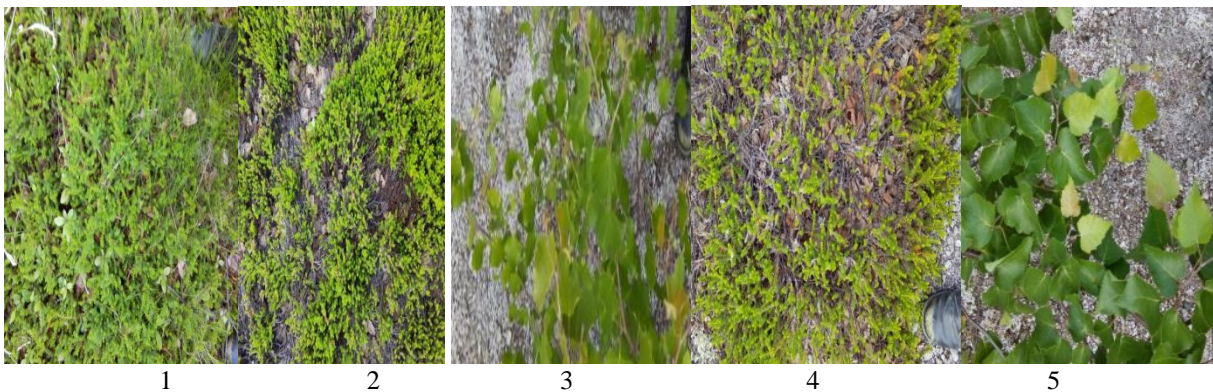


Рисунок 3 – Фотоизображения 5 тестовых площадок на которых проводились спектральные измерения.

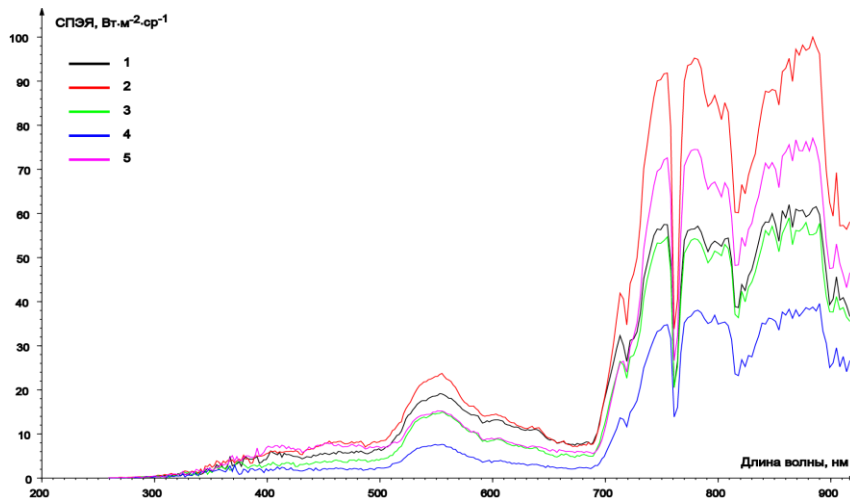


Рисунок 4 – Кривые спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) 5 тестовых площадок.

Третья группа тестовых площадок выбиралась на левом берегу реки Теплой, 6,5 км от истоков, на высоте 300 м, и расположена в верхней части пирокластического чехла, вскрыто-



го и частично переотложенного ветровой эрозией, представляет собой тефру дацитового состава извержения вулкана Штюбеля 1907 г. Растительность представлена мохово-лишайниковым сообществом с доминирующим участием накипных и кустистых лишайников (виды родов *Cladonia*, *Cladina*, *Stereocaulon* и др.). Растительные сообщества не сформированы. На площадках отмечены отдельные куртины трав и древесной растительности: подрост душешкии и каменной березы.

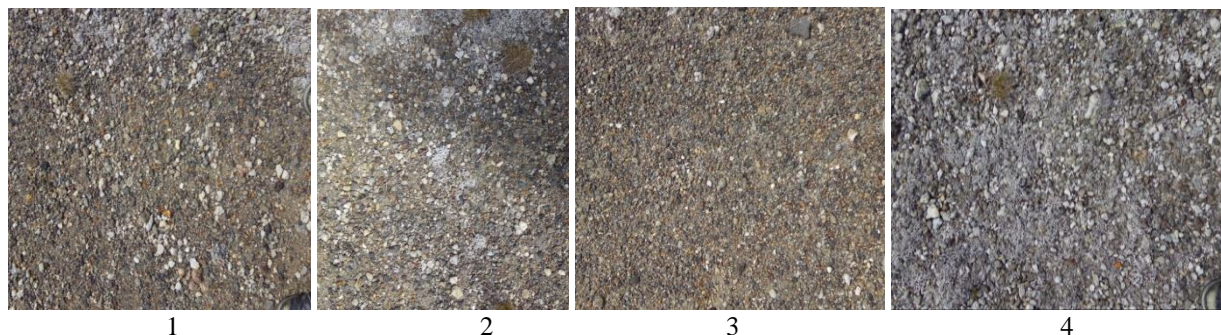


Рисунок 5 – Фотоизображения 4 тестовых площадок, на которых проводились спектральные измерения

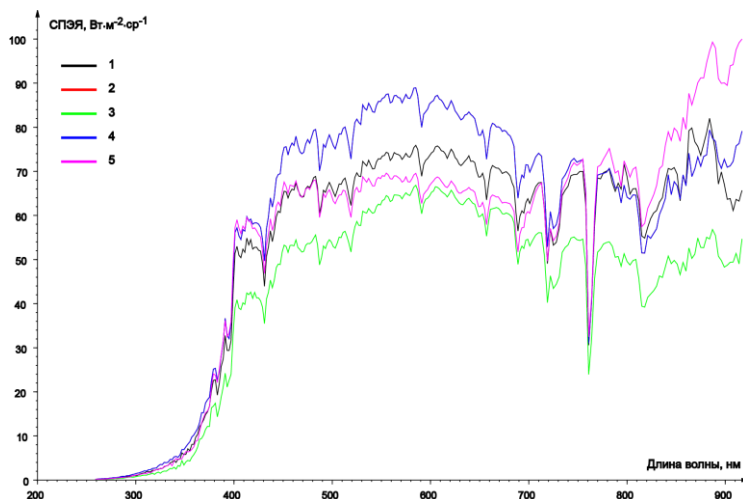


Рисунок 6 – Кривые спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) 4 тестовых площадок.

Аналогичные исследования были проведены и на вулкане Ильинском [3]. Пересчитанные и нормализованные полевые данные загружены в Базу Спектральных Эталонов по адресу: <http://spectral.igras.ru> для целей создания обучающей выборки спектральных характеристик подстилающих поверхностей природных ландшафтов для объектно-ландшафтного дешифрирования космических спектрально-зональных и гиперспектральных данных вулканически активных зон.

#### Список литературы

1. Беляев Б.И., Станчик В.В., Крот Ю.А., Веллер В.В., Доморацкий А.В., Казак А.А., Попков А.П. Мобильный фотоспектрометр и двухканальный модульный спектрометр для полевых измерений спектров отражения объектов // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Сборник тезисов докладов конференции. Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2016. Доступ: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/thesisshow.aspx?page=0&thesis=5686](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=0&thesis=5686)
2. Бручовская С. И., Литвинович Г. С., Бручовский И. И., Катковский Л. В. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Журн. приклад. спектроскопии. – Минск, 2019. – Т. 86, №4. – С. 620–627.
3. Малышев В.Б. Беляев Ю.В. Бручовская С.И. Спектральные исследования ландшафтов Ходуткинского вулканического массива Южная Камчатка. – Москва, 2021. – Т.18, № 1. – С. 103-115

## **РЕФРАКЦИЯ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТ И АЗИМУТАЛЬНЫХ УГЛОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА**

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

На основе данных стандартной атмосферы, барометрической формулы и полуэмпирической функциональной зависимости показателя преломления воздуха от температуры, давления и длины волны лазерного излучения построена модель рефракции для различных высот, вплоть до космических, и различных зенитных расстояний. По данной модели в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне лазерного излучения проведены численные расчеты, показывающие хорошее согласие с результатами расчета по формуле астрономической рефракции, в той области зенитных расстояний, где формула астрономической рефракции еще хорошо согласуется с астрономическими наблюдениями и измерениями. А также приведены результаты расчетов, по построенной модели, показывающие хорошее согласие с известными астрономическими данными по рефракции в области больших зенитных расстояний, где расчеты по формуле астрономической рефракции сильно расходятся с астрономическими данными.

В настоящее время начинается революционный переход на лазерные системы атмосферной и космической связи и навигации. В мае 2022 года NASA на околоземную орбиту была выведена лазерная коммуникационная система TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD), созданная в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology, MIT), обеспечившая канал связи с Землей на скорости 100 Гб/с. Это в 1000 раз превосходит скорость современной космической радиосвязи (100 Мб/с). В близкой перспективе выход TBIRD на скорости в 200 Гб/с и выше [1]. «Росатом», институт РФЯЦ-ВНИИЭФ, запланировали выпустить опытный образец аппаратуры для космической лазерной связи на скорости 100 Гб/с, и планируют в 2024 году провести эксперимент с космической лазерной связью, где будут участвовать аппарат «Прогресс» и МКС [2].

Системы поиска, наведения и сопровождения являются одними из ключевых в лазерных системах связи и навигации [3,4]. А рефракция, ее точный расчет, и последующая корректировка направления лазерного луча являются основными задачами в решении проблем поиска, наведения и сопровождения объекта лазерной связи, устойчивости установленного канала связи и навигации, определении его точных координат и скоростей

Теория рефракции, как известно, весьма сложна и полученные астрономические формулы расчета рефракции получены с большими упрощениями и приближениями и резко теряют свою точность и адекватность реальности при сравнительно больших видимых зенитных расстояниях  $z_1$ , углах отклонения лазерного луча от зенита. Так уже при  $z_1$  около 70 градусов и более астрономические формулы рефракции дают погрешность более 1". А в 1" погрешность дает линейное боковое смещение лазерного луча или неопределенность для низкоорбитальных систем (500 км) на более чем 2.4 м, для геостационарных орбит (36000 км) дает боковое отклонение лазерного луча и неопределенность более 174 м.

Нами исследовалась модель рефракции на основе данных стандартной атмосферы, согласно действующему стандарту ГОСТ 4401-81[5]. Данный стандарт соответствует международному стандарту ISO 2533. Для расчета давления с изменением высоты была использована барометрическая формула. Полуэмпирическая формула функциональной зависимости показателя преломления воздуха от температуры, давления и длины волны лазерного излучения [6] использована в нашей модели. Эта формула для показателя преломления воздуха хорошо согласуется с формулами, полученными другими авторами [7,8]. Наша модель также учитывает влияние кривизны Земли. Выполнены расчеты по этой модели рефракции для различных высот, вплоть до космических, и различных зенитных расстояний. Модель хорошо работает для всех зенитных расстояний. Кроме того, в отличие от астрономических формул, она позволяет выполнять расчеты рефракции не только интегрированно для всей атмосферы Земли, но и дифференцированно в различных слоях

атмосферы, например, тропосферы, что обеспечивает расчет и учет рефракции атмосферы в лазерной связи и навигации авиасистем.

В ближнем ИК диапазоне на длине волны 800 нм лазерного излучения проведены численные расчеты, показывающие хорошее согласие с результатами расчета по формуле астрономической рефракции, в той области зенитных расстояний, где формула астрономической рефракции еще хорошо согласуется с астрономическими наблюдениями и измерениями. Приведены результаты расчетов, по построенной модели и по астрономическим формулам, построены графики для различных зенитных расстояний и высот атмосферы, показывающие хорошее согласие с известными астрономическими данными по рефракции в области больших зенитных расстояний, где расчеты по формулам астрономической рефракции сильно расходятся с астрономическими данными.

#### Список литературы

1. <https://www.spacedaily.com/reports>
2. <https://naked-science.ru/article>
3. Лазерная связь. /А. Г. Шереметьев, Р. Г. Толпаров - М.: «Связь», 1973 - 384 с.
4. Оптическая связь. / Р. М. Гальярди, Ш. Карп - М.: Связь, 1978 - 424 с.
5. Справочник по физическим параметрам атмосферы. / Ю.А.Глаголев -Л.: Гидрометеорологическое Изд., 1970 — 212 с.; <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/LCRD.html>
6. Распространение лазерного пучка в атмосфере/ Под ред. Д. Стробена — М.: «Мир», 1981 — 416 с.
7. The Refractive Index of Air. / B. Edlen. Metrologia, -1966 - **2**, 71 — 80.
8. Astronomical Refraction: Computational Method for All Zenith Angiel/ L. H. Auer, E.M. – The Astronomical Journal - 2000 – **119**, 2472.
9. Astronomical Refraction in politropic atmosphere. / B. Garfinkel. The Astronomical Journal – 1967 – **72**, № 2, 235.
10. Astronomical Refraction. / M.E. Thomas and R.I. Joseph. Johns Hopkins APL Technical Digest – 1996 – **17**, № 3, 279.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОВОЛОКОННОГО КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК БРЭГГА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Представлены разработанная схема квазираспределенной волоконно-оптической системы измерения температуры на основе решеток Брэгга (ВБР), предназначенная для использования на космических аппаратах, и результаты теоретических исследований метрологических характеристик в диапазоне температур от -140 °С до +200 °С при использовании металлизированных ВБР и без покрытия.

Оптоволоконные технологии измерения физических параметров являются одной из наиболее быстроразвивающихся областей прикладной оптики. Волоконно-оптические датчики характеризуются малым весом, размером, пожаро- и искро- безопасностью, нечувствительностью к электромагнитным помехам и воздействию агрессивных сред и достаточно просто интегрируются в распределенные измерительные системы. Благодаря этим свойствам они широко используются при решении различных задач, в которых необходимо измерять температуру, деформацию и другие параметры протяженных объектов [1].

Одним из наиболее распространенных точечных и квазираспределенных датчиков, в которых волокно одновременно выполняет функции чувствительного элемента и канала передачи информации, являются измерители, основанные на использовании волоконной брэгговской решетки (ВБР) в качестве преобразователя измеряемого физического воздействия в спектральный сдвиг отраженной брэгговской длины волны [2,3]. Волоконная решетка Брэгга представляет собой дифракционную решетку, локализованную в сердцевине оптического волокна, которая образована за счет периодического изменения показателя преломления кварцевого стекла под воздействием лазерного излучения. Основными характеристиками решетки являются распределения амплитуды и периода модуляции показателя преломления (ПП), а также среднего значения, наведенного ПП вдоль оси световода. Эти параметры задают спектральные, дисперсионные и энергетические свойства решеток и, таким образом, определяют их использование в различных приложениях волоконной оптики.

Функциональная схема разработанного квазираспределенного волоконно-оптического измерителя на основе однородных решеток Брэгга с металлическим покрытием приведена на рисунке 1. На вход оптического волокна подается излучение от источника (или набора источников) с широким спектром излучения, которое последовательно проходит набор брэгговских решеток с различной центральной резонансной длиной волны. Излучение, отраженное от ВБР, усиливается волоконно-оптическим эрбиевым усилителем EDFA, регистрируется оптическим спектроанализатором ОСА и на основании сдвига центральных резонансных длин волн делается вывод об изменении температуры брэгговских решеток относительно температуры калибровки. Для увеличения чувствительности системы на брэгговские решетки напыляется металлическое покрытие. Минимальное спектральное расстояние между отраженными брэгговскими длинами волн определяется, исходя из условия отсутствия наложения пиков отражения на соседних длинах волн, то есть из предполагаемого диапазона измеряемых температуры. Точность измерений зависит от ширины спектра отражения ВБР и разрешающей способности спектроанализатора.

В связи с тем, что чувствительные элементы датчика, состоящие из волоконного световода и набора ВБР, могут быть расположены непосредственно в оболочке космического летательного аппарата и подвергаться в процессе полета в условиях открытого космоса значительным изменениям температуры, была разработана математическая модель и проведены исследования величины сдвига центральной частоты Брэгга в температурном диапазоне от -140 °С до +200 °С.

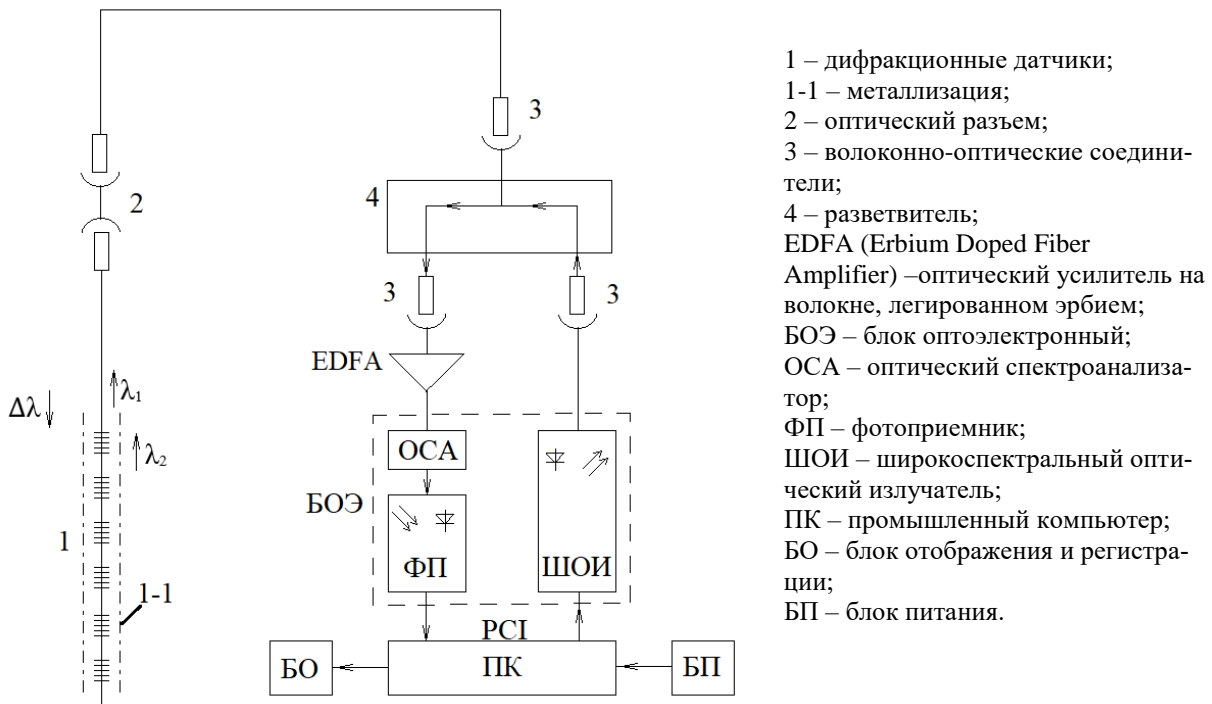


Рисунок 1 – Функциональная схема квазираспределенной волоконно-оптической измерительной системы на основе решеток Брэгга

Поскольку волоконно-оптические датчики температуры могут использоваться в космических аппаратах, важным фактором являются массогабаритные параметры. Показано, что толщина металлического покрытия не должна превышать 200 мкм, поскольку дальнейшее увеличение толщины не приводит к значительному увеличению чувствительности датчика, однако увеличивает его массу, что учитывалось при дальнейших расчетах. В результате численного моделирования смещения брэгговской длины волны для решеток, покрытых никелем, алюминием, медью и без покрытия в диапазоне температур от 0 °С до +200 °С установлено, что наибольшей чувствительностью обладают решетки с алюминиевым покрытием. Увеличение температурной чувствительности датчика в этом случае достигает 7,5 раз по сравнению с ВБР без покрытия. При моделировании смещения брэгговской длины волны для решеток, покрытых никелем, алюминием, медью и без покрытия в диапазоне температур от –140 °С до 0 °С показано, что для указанного диапазона максимальная чувствительность увеличивается в 4 раза.

Из полученных зависимостей следует, что металлизирование ВБР приводит к увеличению чувствительности температурного датчика, что снижает требования к ширине спектра отражения ВБР и разрешающей способности спектроанализаторов при сохранении требуемой точности измерения. С другой стороны, расширение интервала сдвига брэгговской длины волны излучения в зависимости от изменения температуры приводит к уменьшению количества решеток, которые можно мультиплексировать в пределах ширины спектра излучения оптического источника в 3,5 раза при выполнении условия отсутствия наложения спектров соседних ВБР при их смещении во всем измеряемом интервале температур.

#### Список литературы

1. Поляков, А.В. Волоконно-оптические информационно-измерительные WDM-системы / А.В. Поляков. – Riga, Latvia: LAMBERT Academic Publishing RU, 2018. – 319 с.
2. Simultaneous measurement for strain and temperature using fiber Bragg gratings and multimode fibers / D.-P. Zhou, L. Wei, W.-K. Liu [et al.] // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47, № 10. – P. 1668–1672.
3. Леонович, Г.И. Гибридные датчики на волоконно-оптических брэгговских решетках / Г.И. Леонович, С.В. Олешкевич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 1340–1344.

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОПТОВОЛОКОННОЙ БУФЕРНОЙ ПАМЯТЬЮ В СИСТЕМАХ ЛАЗЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Теоретически показано, что применение в схеме волоконно-оптического динамического запоминающего устройства (ВОДЗУ), предназначенного для использования в качестве быстродействующей буферной памяти в системах космической лазерной связи, гибридного оптического усилителя, состоящего из рамановского и эрбиевого усилителей, приводит к увеличению времени хранения информации в ВОДЗУ в два раза при вероятности ошибки  $BER=10^{-9}$  по сравнению с использованием только волоконного эрбиевого усилителя.

Для осуществления высокоскоростного широкополосного обмена данными как между спутниками, так и с наземным сегментом все чаще предлагается использовать оптический диапазон. Одной из главных особенностей оптических лазерных систем связи по сравнению с радиосистемами являются существенно более узкие диаграммы направленности лучей и увеличенные коэффициенты усиления передающих оптических антенн (что позволяет получить большое отношение сигнал/шум и достичь очень высокой пропускной способности линий связи). Для того чтобы избежать потерь информации при высокоскоростной передаче данных в космических и наземных сегментах спутниковых сетей связи необходимо применять специализированные быстродействующие буферные запоминающие устройства. Одним из перспективных направлений решения подобных задач является использование волоконно-оптических динамических запоминающих устройств (ВОДЗУ). Достоинством ВОДЗУ является то, что запись информационного потока в них осуществляется в реальном масштабе времени, а хранение данных возможно в течение времени, необходимого для их последующей обработки. Кроме того, в оптоволоконных системах существует возможность организации по одному световоду одновременно нескольких информационных каналов, используя технологию плотного спектрального мультиплексирования.

Разработана [1] архитектура цифрового волоконно-оптического динамического запоминающего устройства со спектральным уплотнением информационных каналов. Отличительной особенностью данной структуры является следующее. Во-первых, использование комбинации стандартного одномодового волокна и волокна с отрицательной дисперсией позволило уменьшить результирующую хроматическую дисперсию более чем на два порядка. Во-вторых, применяются два волоконно-оптических эрбиевых усилителя, первый из которых является линейным усилителем и компенсирует потери в петле рециркуляции, а второй представляет собой выходной усилитель мощности и позволяет исключить использование электронных усилителей на выходе каждого фотоприемника. С целью увеличения времени хранения информации в оптическом диапазоне осуществлялась 2R-регенерация (re-amplifying+re-shaping) циркулирующих информационных сигналов с помощью нелинейного оптического кольцевого зеркала (НОКЗ). Это дает возможность работать с гигагерцовыми скоростями записи информационного потока и не осуществлять промежуточное периодическое преобразование сигналов из оптического диапазона в электрический и обратно.

На основе разработанной математической модели проведены исследования эффекта разрушения оптических информационных полей в процессе хранения цифровой информации при спектральной и временной компрессии входных потоков. Расчеты осуществлялись при скорости передачи информации  $B=10$  Гбит/с и  $B=2,5$  Гбит/с для RZ-кодирования. Показано, что совместное влияние амплитудных флуктуаций, явления временного джиттера приводит к появлению максимума времени хранения в зависимости от длины оптоволоконной петли. Установлено, что значение этой длины не зависит от скорости поступающей информации, мощности излучения лазера и коэффициента усиления волоконного эрбиевого усилителя мощности EDFA<sub>2</sub>. Получено, что для длины волоконно-оптической петли хранения  $L=19$  км

при заданной вероятности ошибки  $BER < 10^{-9}$  и мощности излучения полупроводникового лазерного источника излучения  $P_{л}=10$  мВт время хранения информации равно  $t_{хр1}=9,6$  с (скорость информационного потока  $B=10$  Гбит/с); для  $B=2,5$  Гбит/с время хранения  $t_{хр2}=38$  с.

Вероятность ошибки зависит от значения отношения сигнал/шум в процессе рециркуляции. Проведенный анализ показал, что основной вклад в отношение сигнал/шум вносят шумы линейного оптического усилителя EDFA<sub>1</sub>. Мощность шума, вносимого EDFA, состояла из линейно накапливавшейся на каждом цикле рециркуляции мощности усиленного спонтанного излучения, и шума, связанного с квантовыми флуктуациями. При сонаправленной накачке шум-фактор эрбиевого усилителя равнялся 3,7 дБ. Для уменьшения шум-фактора предложили использовать гибридный усилитель, представляющий собой комбинацию эрбиевого и распределенного рамановского усилителя встречной накачки, предназначенный для усиления сигналов в С-диапазоне сетки DWDM, при этом рамановский усилитель являлся первым каскадом усиления [2]. Поскольку шум-фактор рамановского усилителя значительно меньше, чем у эрбиевого усилителя, а как известно, результирующий шум гибридного усилителя в основном определяется шумами первого каскада усиления, основное преимущество гибридного усилителя заключается в существенном уменьшении уровня шума на приемной стороне. Проведенные эксперименты показали [2], что наилучшая равномерность усиления достигалась в рамановском усилителе при использовании полупроводниковых лазеров накачки со стабилизацией длины волны брэгговской решеткой на длине волны 1452 нм с максимальной мощностью 300 мВт и на длине волны 1427 нм с максимальной мощностью 220 мВт. В этом случае шум-фактор гибридного усилителя уменьшался до 1,5–2 дБ, коэффициент усиления достигал 31 дБ. Относительный же недостаток – более значительная неравномерность спектра усиления по сравнению с обычным эрбиевым усилителем. На рисунке 1 представлены результаты моделирования времени хранения оптической информации в ВОДЗУ при использовании гибридного усилителя.

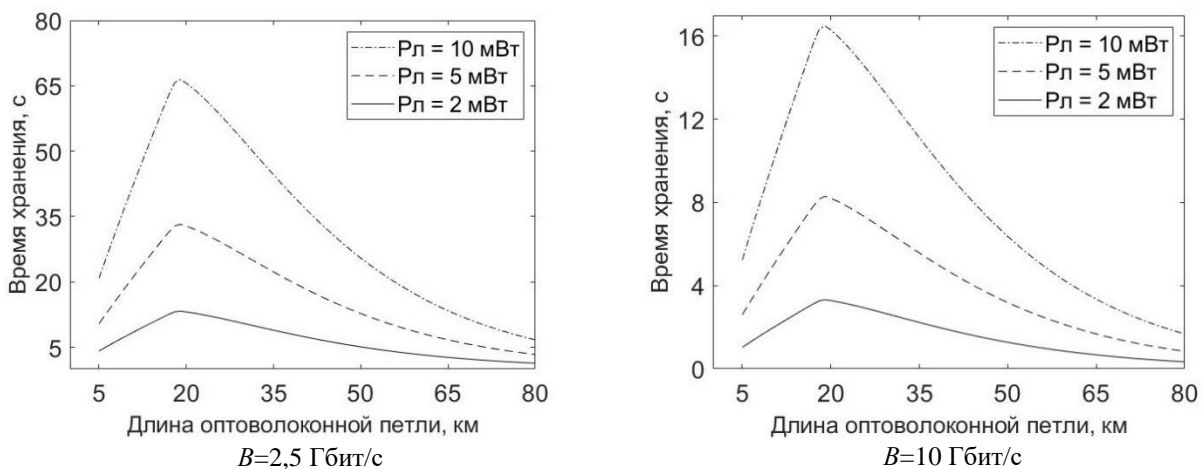


Рисунок 1 – Зависимость времени хранения информации в ВОДЗУ при использовании гибридного оптического усилителя для различной пиковой мощности входных лазерных оптических импульсов

Таким образом, снижение шумов линейного оптического усилителя в схеме ВОДЗУ при использовании гибридного усилителя, состоящего из рамановского и эрбиевого усилителей, приводит к увеличению времени хранения информации в два раза при вероятности ошибки  $BER=10^{-9}$  по сравнению с применением одного линейного эрбиевого усилителя.

#### Список литературы

1. Polyakov, A. V. Simulation of fiber-optic buffer loop memory with all-optical 2R regeneration / A. V. Polyakov // Optical Memory and Neural Networks. – 2020. – Vol. 29, №. 2. – P. 100–109.
2. Широкополосный гибридный оптический усилитель: как улучшить существующие ВОЛС / И. Шихалиев, С. Лукиных, О. Наний [и др.] // Первая миля. – 2018. – № 2. – С. 67–72.

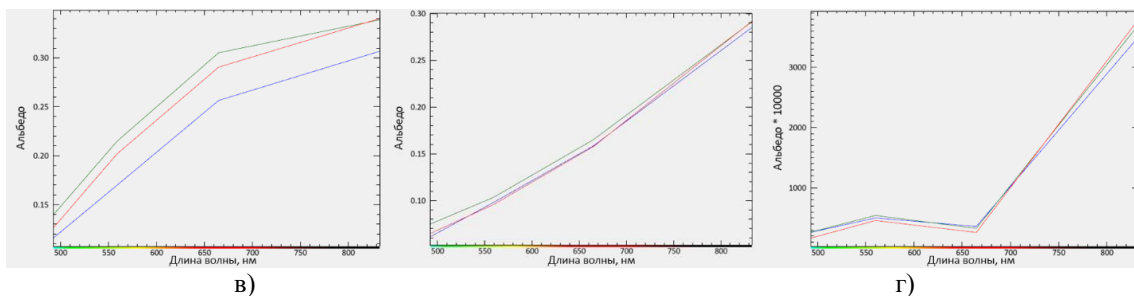
## АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко», БГУ, Минск, Республика Беларусь

В работе приведены результаты атмосферной коррекции мультиспектральных космических изображений спутникового сенсора Sentinel-2 с использованием модуля FLAASH программного комплекса (ПК) ENVI и разработанного метода CAT. Спектральные значения альbedo поверхности, восстановленные по методами CAT, FLAASH, сравниваются с данными Sen2Cor, принятыми условно за эталонные. На основе проведенных сравнений предлагаются способы модификации метода CAT для корректного восстановления аэрозольной оптической толщины атмосферы.

Метод CAT (Correction of ATmosphere) [1] разработан для мультиспектральных спутниковых данных с небольшим количеством относительно широких спектральных каналов и основан на аналитических формулах, описывающих с достаточно высокой точностью спектр уходящего излучения на верхней границе безоблачной атмосферы. Метод CAT включает модель атмосферы и ее оптико-физические параметры, которые существенны с точки зрения переноса излучения, атмосфера считается однородной в пределах изображения. Отличительной особенностью метода CAT является отсутствие необходимости априорного задания каких-либо параметров атмосферы или подстилающей поверхности. При заданной геометрии съемки вся необходимая информация извлекается непосредственно из корректируемых изображений. В настоящей модификации метод применяется для каналов спектрального диапазона 400 – 1100 нм.

Для оценки корректности работы метода было произведено сравнение его результатов с результатами атмосферной коррекции по известным методам Sen2Cor и FLAASH (ПК ENVI) [2]. Для сравнительного исследования методов использовались изображения спутникового сенсора Sentinel-2 с разрешением 10 м на территорию полигонов, входящих в состав сети RadCalNet [3]: два изображения полигона LaCrau, расположенного во Франции, и одно изображение полигона Baotou, расположенного в Китае. Сравнение методов производилось относительно «опорного» метода Sen2Cor, так как данный метод разработан и реализован поставщиком данных Sentinel-2, данные которого использовались в работе. На рисунке 1 показаны примеры альbedo для трех различных подстилающих поверхностей, восстановленные указанными тремя методами.



Красная линия – FLAASH; Зеленая линия – level-2a; Синяя линия – CAT  
 а) – песок, baotou-20220811; б) – поле, lacrau-20210616; в) – зелень, lacrau-20210616  
 Рисунок 1 – Альbedo разных типов поверхностей пикселей изображений

Из сравнения результатов можно сделать вывод, что метод CAT несколько хуже восстанавливает альbedo светлых поверхностей и значения аэрозольной оптической толщины.



Секция 5. Аэрокосмические исследования и технологии ДЗЗ

Для наглядного представления сравниваемых пространственных распределений альbedo вычислялись линейные корреляций альbedo, полученных двумя методами, на основе линейного уравнения регрессии с коэффициентами  $k$  и  $b$  вида:

$$y = kx + b$$

где  $y$  – альbedo по Sen2Corr;  $x$  – альbedo по сравниваемому методу.

Коэффициент  $b$  в уравнении линейной корреляции оказался близким к нулю, поэтому им можно пренебречь. В таблице 2 приведены значения коэффициента  $k$  для метода FLAASH и CAT, соответственно, для трех рассматриваемых сцен изображений Sentinel -2.

Таблица 2

Значения коэффициента  $k$  для трех сцен в методах FLAASH и CAT

Канал	baotou-20220811	lacrau-20210616	lacrau-20220911	baotou-20220811	lacrau-20210616	lacrau-20220911
	метод FLAASH			метод CAT		
B2	1.1	0.944	0.854	2.643	1.282	1.123
B3	1.081	1.022	0.886	2.224	1.298	1.111
B4	1.068	1.017	0.91	1.777	1.152	1.071
B8	0.961	0.974	0.914	1.252	1.026	1.1

Из средних значений коэффициента  $k$  можно заключить, что метод FLAASH восстанавливает альbedo каналов с разрешением 10 м с точностью в среднем не хуже 10%. В то же время, в методе CAT особенно большие смещения оценки имеют место для сцены baotou-20220811, что может объясняться некорректным заданием параметров модели атмосферы для этой сцены, которые считаются известными (и такими же, как для других сцен), неизвестными являются только три параметра атмосферы. Жестким заданием ряда параметров атмосферы в методе CAT объясняется в среднем невысокая точность восстановления альbedo. Предлагаются следующие пути модификации метода:

– иной выбор начального пикселя. Вместо «темного» с постоянным по спектру альbedo пикселя предлагается задавать альbedo выбираемого пикселя как:

$$\rho_0 = \rho_{\lambda_1} + \frac{\rho_{\lambda_2} - \rho_{\lambda_1}}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda - \lambda_1)$$

– включение учета пропускания водяного пара как:

$$T_{H_2O}^\lambda(m_{H_2O}) = a_{H_2O}(\lambda) \ln(m_{H_2O}) + b_{H_2O}(\lambda)$$

где  $a_{H_2O}(\lambda)$ ,  $b_{H_2O}(\lambda)$  – заранее рассчитанные константы для каждой длины волны,  $m_{H_2O}$  – масса водяного пара в столбе атмосферы.

Затем существующий алгоритм метода атмосферной коррекции используется в качестве первой итерации для нахождения альbedo поверхности. Затем вычисляется разность спектров (СПЭЯ) двух выбранных контрастных пикселей, теоретическое выражение для которой является наиболее точным, поскольку не содержит вклада атмосферной дымки. По полученной разности при известных альbedo двух пикселе вычисляются уточненные значения параметров атмосферы, включая аэрозольную оптическую толщину, и следующей итерацией вычисляются новые значения альbedo поверхности по найденным параметрам атмосферы. Предполагается, что такая модификация метода CAT позволит более точно восстанавливать параметры атмосферы и, в частности, АОТ.

Список литературы

1. Катковский Л. В. Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых изображений // Український журнал дистанційного зондування Землі. – 2020. – № 25. – С. 9–16.
2. FLAASH Background. – URL: <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/backgroundflaash.html> (дата обращения 16.02.2023).
3. Radiometric Calibration Network portal. – URL: <https://www.radcalnet.org/#/> (дата обращения 06.02.2023).

УДК 521.31

Спиридонов А. А., Баранова В. С., Черный В. Е., Евчик В. Е., Шалатонин И. А.,  
Лешкевич С. В., Ушаков Д. В., Саечников В. А.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Представлены результаты апробации метода начального определения орбиты неизвестного СМКА в групповом запуске из 40 спутников, использующего доплеровские измерения над наземной станцией приема и статистический анализ относительной частоты успеха параметров пролета при отсутствии данных в базе орбитальных параметров. Показано, что диапазоны поиска орбитальных параметров спутника можно уменьшить за счет моделирования запуска.

Прогнозирование движения сверхмалых космических аппаратов (СМКА) – нано и пикоспутников – является одной из основных задач баллистико-навигационного обеспечения (БНО) полета от решения которой зависит успешная эксплуатация спутника. Причем, по мере развития СМКА и повышением уровня сложности выполняемых ими научных задач, ужесточаются и требования к точности прогнозирования его движения. Для прогнозирования будущих пролетов СМКА над наземной станцией приема (НСП) и обработки информации используется аналитические модели SGP (*Simplified General Perturbations* – упрощенная модель общих возмущений) с начальными орбитальными данными в формате TLE (*two-line elements* – двухстрочный набор элементов), предоставляемыми объединённым центром космических операций США (JSpOC- Joint Space Operations Center USA). В последнее время из-за роста количества запускаемых спутников качество TLE файлов по СМКА снизилось, а при групповых запусках этого класса космических аппаратов информация в течении первых нескольких недель может быть неполная. Поэтому получение собственных начальных данных для аналитических и численных моделей прогнозирования движения СМКА на основе траекторных измерений и данных бортового навигационного приемника является актуальной проблемой. Самый доступный способ траекторных измерений для университетской НСП – это пассивные однопроходные (СМКА-НСП) доплеровские измерения радиосигналов телеметрии. В работах [1-2] был представлен метод определения орбиты неизвестного СМКА на основе вероятностной оценки параметров приема по данным доплеровских измерений радиосигнала телеметрии, где для решения используется четырёхпараметрический вектор состояния.

В данной работе рассматривается апробация разработанного метода для определения начального вектора состояния неизвестного СМКА по доплеровским измерениям в первые дни группового запуска при отсутствии данных в базе орбитальных параметров системы JSpOC. В случае группового запуска СМКА можно существенно сократить диапазон изменения неизвестных орбитальных параметров на основе анализа данных по запуску и TLE файлов идентифицированных КА.

В работе представлено определение и идентификация орбиты СМКА для группового запуска 01.04.2022 по доплеровским измерениям радиосигналов телеметрии. НСП БГУ за период времени с 12.04.2022 г. до 15.04.2022 г. провела 47 измерений времени приема и частоты радиосигналов телеметрии неизвестного СМКА из этого группового запуска. Для численного моделирования задачи определения орбитальных параметров были отобраны 10 измерений на 5 пролетах и 20 измерений на 11 пролетах за период от 14.04.2022 г. до 15.04.2022 г. Была рассчитана средняя частота  $\langle f^{\text{exp}} \rangle = 437.240$  МГц (оценка номинальной частоты радиосигналов) и доплеровский сдвиг частоты  $\Delta f_i^{\text{exp}} = f_i^{\text{exp}} - \langle f^{\text{exp}} \rangle$  радиосигналов телеметрии. Проводился анализ информации провайдера запуска о групповом запуске с участием 40 спутников, который был осуществлен с космической станции «Мыс Канаверал»

(28°29'20" СШ, 80°34'40" ЗД) двухступенчатой ракетой-носителем Falcon 9 FT (время активной части траектории  $\tau_a = 559$  с). Расчетные параметры орбиты имели наклонение  $i = 97,38^\circ$ , период  $T = 5680$  с (высота  $H = 500$  км). Время запуска 01 апреля 2022 г., 16:24:17 UTC. Используя эти данные и предстартовый расчет орбиты [3], был определен вектор состояния малого спутника  $\mathbf{X}(t_e) = (94,67 \text{ мин}, 97,38^\circ, 174,6^\circ, 162,9^\circ)$  на момент эпохи старта  $t_e = 16:35:17$  UTC. Затем на основе этого вектора состояния малого спутника выполнялось прогнозирование на момент определения орбиты  $t_{OD}$ , которое совпадает с одним из времен приема радиосигналов телеметрии неизвестного малого спутника. Учитывались только вековые возмущения аргумента широты  $u$  и долготы восходящего узла  $\Omega$ . Был оценен вектор состояния  $\mathbf{X}(t_{OD}) = (T_{OD}, i_{OD}, u_{OD}, \Omega_{OD}) = (94,67 \text{ мин}, 97,38^\circ, 35^\circ, 188,5^\circ)$  на момент времени определения орбиты  $t_{OD} = 21:05:05$  UTC 15.04.2022. По результатам оценки вектора состояния  $\mathbf{X}(t_{OD})$  выбирались диапазоны изменения периода  $T$  от 5660 до 5690 с с шагом 1 с, наклонения  $i$  от  $97,350^\circ$  до  $97,410^\circ$  с шагом  $0,005^\circ$ , аргумента широты  $u$  от  $30^\circ$  до  $70^\circ$  с шагом  $1^\circ$  и долготой восходящего узла  $\Omega$  от  $186,5^\circ$  до  $190,5^\circ$  с шагом  $0,5^\circ$ .

Далее для всех возможных наборов параметров орбиты ( $T, i, u, \Omega$ ) из диапазонов их изменения параметры пролета (угол места  $el$  и доплеровский сдвиг частоты  $\Delta f_i^{calc}$ ) СМКА над НСП в момент времени измерения  $t_i$  численно рассчитаны в модели возмущённого кругового движения. Относительная частота успеха  $\beta$  для заданного набора орбитальных параметров  $\mathbf{X}(T, i, u, \Omega)$  рассчитывалась как:

$$\beta = (N_1 / N) \cdot 100\% ,$$

где  $N_1$  - количество точек измерения с углом места  $el > 0$  и отклонением расчетного доплеровского сдвига частоты  $\Delta f_i^{calc}$  от измеренного доплеровского сдвига частоты  $\Delta f_i^{exp}$  менее  $\Delta f_{max}$  (максимальная ошибка, связанная с нестабильностью частоты бортового передатчика).

Наконец, неизвестные параметры орбиты спутника определяются путем анализа по максимальному значению относительной частоты успеха  $\beta$ . При отсутствии однозначного орбитального определения необходимо уменьшить шаг изменения орбитальных параметров или увеличить количество точек измерений. На рисунке 1 представлены зависимости количества возможных наборов параметров орбиты ( $T, i, u, \Omega$ ) от относительной частоты успеха  $\beta$  этого набора параметров орбиты по данным измерений для 10 и 20 точек. Оказалось, что существует 871 (для 10 точек измерений) и 42 (для 20 точек измерений) наборов параметров орбиты с  $\beta$  в интервале 50–60 % и всего два набора параметров орбиты  $\mathbf{X}_1 = (5672 \text{ с}, 97,400^\circ, 54^\circ, 188,5^\circ)$  и  $\mathbf{X}_2 = (5672 \text{ с}, 97,400^\circ, 54^\circ, 188,0^\circ)$  для 20 точек и 10 наборов параметров орбиты для 10 точек с  $\beta > 80\%$ . После уменьшения шага изменения долготы восходящего узла  $\Omega$  до  $0,25^\circ$  только один набор параметров орбиты  $\mathbf{X} = (5672 \text{ с}, 97,400^\circ, 54^\circ, 188,25^\circ)$  имел максимальное значение относительной частоты успеха  $\beta=90\%$ , что позволило однозначно определить вектор состояния неизвестного СМКА на основе обработки доплеровских измерений.

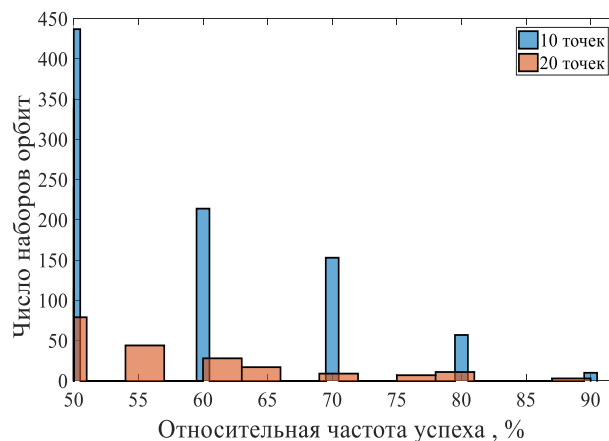


Рисунок 1 – Число возможных наборов орбит (с  $\beta$  выше 50%) в зависимости от  $\beta$

На основе полученного вектора состояния были спрогнозированы последующие сеансы радиосвязи с неизвестным СМКА, приняты и декодированы радиосигналы его телеметрии. Декодированные пакеты телеметрии позволили идентифицировать чилийский университетский наноспутник PlantSat. После публикации системой JSpOC обновленной базы данных усредненных орбитальных параметров в формате TLE были численно промоделированы параметры наведения антенных систем и доплеровский сдвиг частоты в моменты времени приема радиосигналов телеметрии для каждого из спутников группового запуска 01.04.2022 г. На основе метода идентификации неизвестного СМКА путем сканирования базы данных орбитальных параметров в формате TLE [1] был однозначно определен наноспутник PlantSat разработанный студентами и инженерами Чилийского университета. Это подтвердило полученные результаты и применимость метода определения начального вектора состояния неизвестного СМКА в первые дни группового запуска по доплеровским измерениям на нескольких пролетах над НСП, использующего модель возмущенного кругового движения и статистический анализ относительной частоты успеха параметров пролета при отсутствии данных в базе орбитальных параметров.

#### Список литературы

1. Spiridonov A. A. Small Satellite Orbit Determination Using Single Pass Doppler Measurements. / A. A. Spiridonov, V. A. Saetchnikov, D. V. Ushakov, V. E. Cherny, A. G. Kezik // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. –2022. –Vol.3, № 4. – P. 162-170.
2. Small satellite orbit determination using the university ground station / A. A. Spiridonov, V. A. Saetchnikov, D. V. Ushakov, V. E. Cherny, A. G. Kesik // Proc. 2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace, Pisa, Italy, 22 – 24 June 2020 / IEEE; edited by A. Buffi and M. Marracci. – Pisa, 2020.–P. 117–121.
3. Orbital Parameters Pre-launch Calculation Methods for a Piggyback Launched University Small Satellite / A. Spiridonov, V. Baranova, D. Ushakov, V. Saetchnikov, V. Cherny // Proc. 2022 IEEE 9 th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Pisa, Italy, 27-29 June 2022 / IEEE; edited by M. Marracci. – Pisa, 2022. – P. 486-490.

УДК 550.388.2

Шапкин А. С., Потапов К. О.

## АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕЁ СВЯЗЬ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

В данной работе был синтезирован алгоритм оценки абсолютного полного электронного содержания (ПЭС) на основании результатов двухчастотных фазовых и дальностных измерений сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), сущность которого состоит в комбинировании расчётов ПЭС по фазовым и дальностным измерениям, а также в оценке и учёте ионосферных задержек, вносимых дифференциальными кодовыми задержками (ДКЗ) приёмной станции и спутника. С помощью коэффициента корреляции Пирсона исследована взаимосвязь абсолютного ПЭС и полного вектора индукции (ПВИ) геомагнитного поля. Полученные результаты показывают взаимосвязь между величинами ПЭС и ПВИ. При этом рост ПЭС предшествует на несколько часов росту ПВИ, что может позволить предсказывать изменения магнитного поля по данным ПЭС и представляет интерес для мониторинга ситуации вокруг критически важных объектов, таких как АЭС, ЛЭП и т.д.

Основной характеристикой при изучении ионосферы является ПЭС, определяемое как интеграл от электронной плотности по пути распространения волны с поперечным сечением  $1 \text{ м}^2$  между спутником и наземной станцией:

$$TEC = \int_{L_0}^L n_e(l) dl, \quad (3)$$

где  $L_0$  и  $L$  – нижняя и верхняя точки прохождения ионосферы;  $n_e(l)$  – электронная концентрация на трассе  $l$ . Проводя измерения сигналов ГНСС на двух различных частотах, можно получить оценки ПЭС по дальностным и фазовым измерениям [1]. ПЭС, рассчитанное по фазовым измерениям, обеспечивает высокую точность, но является относительным, а рассчитанное по дальностным измерениям позволяет получить абсолютное значение, но с большой шумовой составляющей и с частотнозависимой ДКЗ аппаратуры спутника и приёмника [1]. В связи с вышеизложенным был синтезирован алгоритм оценки ПЭС на основании результатов двухчастотных фазовых и дальностных измерений.

Пусть в каждый момент времени известны фазовые (фаза несущей)  $O_1$  и  $O_2$  и дальностные (псевдодальность)  $D_1$  и  $D_2$  измерения на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$ , угол места спутника  $\varepsilon$ , ДКЗ спутника  $DCB_s$ .

Алгоритм оценки абсолютного ПЭС состоит из пяти основных шагов.

**Шаг 1.** Подсчёт относительного ПЭС по фазовым измерениям.

$$TEC_\psi = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (O_1 \lambda_1 - O_2 \lambda_2), \quad (4)$$

где  $\chi = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 m_e} \approx 40,308 \text{ м}^3 \text{ Гц}^2$ ;  $O_1$  и  $O_2$  – фазы несущих (в оборотах) на частотах  $f_1$  и  $f_2$ .

**Шаг 2.** Корректировка данных относительного ПЭС.

Отметим, что полученное по формуле (2) относительное ПЭС требуется «очистить» за счёт корректировки *разрывов* и *скачков* в значениях [2]. Скачки (*cycle slips*) и разрывы (*gaps*) представляют собой кратковременный срыв в фазовой синхронизации приёмника на спутниковый сигнал. Исправление разрывов и скачков проиллюстрировано на рисунке 1.

**Шаг 3.** Подсчёт ПЭС по дальностным измерениям.

$$TEC_D = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (D_2 - D_1 + cDCB_s). \quad (5)$$

**Шаг 4.** Оценка абсолютного ПЭС с помощью комбинирования оценок ПЭС, полученных по фазовым и дальностным измерениям.

$$TEC_{abs} = TEC_{\psi} + \langle TEC_D - TEC_{\psi} \rangle. \quad (6)$$

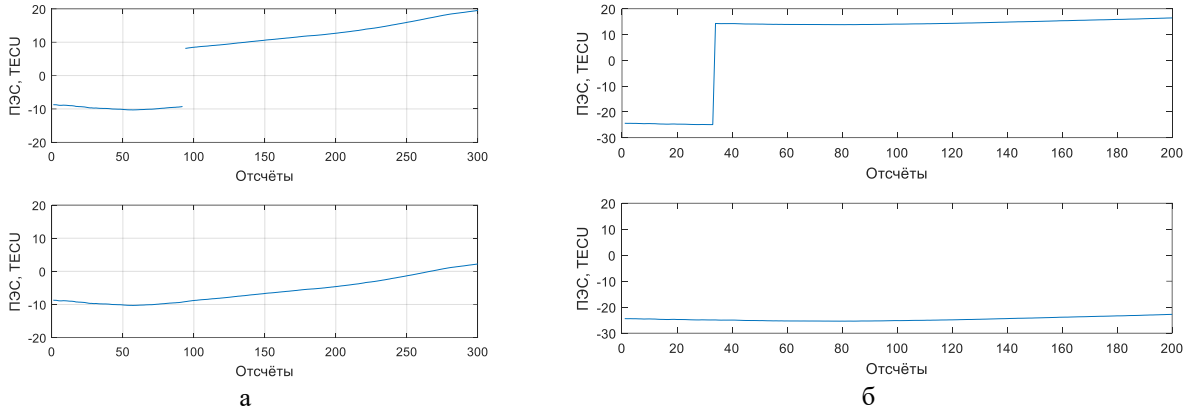


Рисунок 1. Корректировка данных относительного ПЭС: а) исправление разрыва; б) исправление скачка

**Шаг 5.** Уточнение оценки абсолютного ПЭС за счёт оценки ДКЗ приёмной станции.

**Шаг 5.1.** Для  $k$ -ой реализации (пролета спутника) принимается предположительное значение  $DCB_r$ :

$$c'DCB_r^{k,i} = \overline{-75,75}, \quad (7)$$

где  $c' = \frac{1}{\chi} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} c$ ,  $c$  – скорость света.

**Шаг 5.2.** Вычисляется предположительное абсолютное вертикальное ПЭС:

$$TEC_V^{k,i} = (TEC_{abs}^k - c'DCB_r^{k,i}) M(\varepsilon, h), \quad (8)$$

где  $M(\varepsilon, h)$  – множитель для отображения наклонного ПЭС в вертикальное [3]:

$$M(\varepsilon, h) = \cos \left( \arcsin \left( \frac{R_e}{R_e + h_{\max}} \cos(\varepsilon) \right) \right), \quad (9)$$

где  $h_{\max}$  – высота точки максимума электронной концентрации ионосферы;  $R_e$  – радиус Земли.

**Шаг 5.3.** Вычисляется среднеквадратическое отклонение (СКО):

$$S_0^{k,i} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (TEC_V^{k,i} - \overline{TEC_V^{k,i}})^2}. \quad (10)$$

**Шаг 5.4.** Для  $k$ -ой реализации выбирается ДКЗ с минимальным СКО:

$$c'DCB_r^k = c'DCB_r^{k,i}, i = \min(S_0^{k,i}), \quad (11)$$

**Шаг 5.5.** В качестве ДКЗ приёмной станции выбирается среднее ДКЗ по всем реализациям:

$$c'DCB_r = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c'DCB_r^k, \quad (12)$$

где  $K$  – количество реализаций.

**Шаг 5.6.** Получаем окончательное значение абсолютного ПЭС:

$$TEC'_{abs} = TEC_{abs} - c'DCB_r. \quad (13)$$

Упрощённо алгоритм оценки абсолютного ПЭС можно представить в графическом виде, как показано на рисунке 2.

С другой стороны, Национальной системой мониторинга окружающей среды Республики Беларусь регистрируются изменения во времени вектора внешнего геомагнитного поля на горизонтальных и вертикальной составляющих. Величина ПВИ магнитного поля есть корень квадратный из суммы квадратов трех составляющих магнитного поля Земли:

$$B = |\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (14)$$

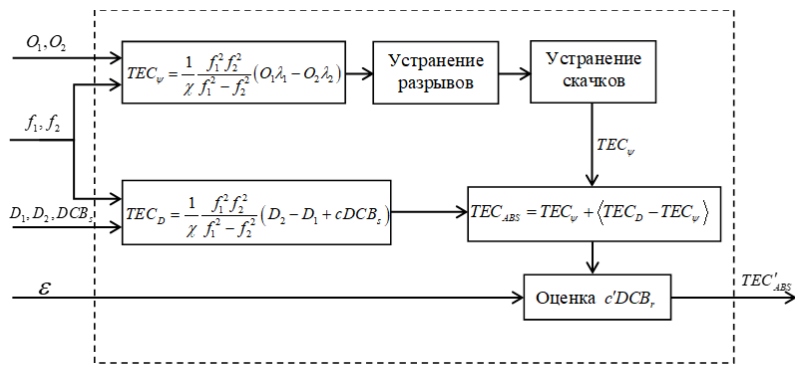


Рисунок 2. Упрощенная блок-схема алгоритма оценки абсолютного ПЭС

Исследовать взаимосвязь полученных оценок абсолютного ПЭС и ПВИ магнитного поля предлагается с помощью коэффициента корреляции Пирсона:

$$R = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)(h_n - m_h)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (x_n - m_x)^2 \sum_{n=0}^{N-1} (h_n - m_h)^2}}, \quad (15)$$

где  $m_x, m_h$  – средние значения ПВИ магнитного поля  $\{x_n\}$  и абсолютного ПЭС  $\{h_n\}$  соответственно. Для исходных ПВИ магнитного поля и абсолютного ПЭС в день с магнитной бурей 17.03.2015 года получен коэффициент Пирсона равный  $R = 0.15$ , что является низким уровнем линейной зависимости. Такой результат может быть связан с тем, что активная фаза магнитной бури отражается на результатах вычисления абсолютного ПЭС раньше, чем на данных измерения ПВИ магнитного поля. Если сместить ПЭС на 5,5 часов в сторону запаздывания, то коэффициент корреляции становится равным  $R = 0.72$ , что является достаточно высоким уровнем. Временные зависимости значений абсолютного ПЭС и ПВИ магнитного поля за март 2015 года в целом и за 17 марта отдельно представлены на рисунке 3.

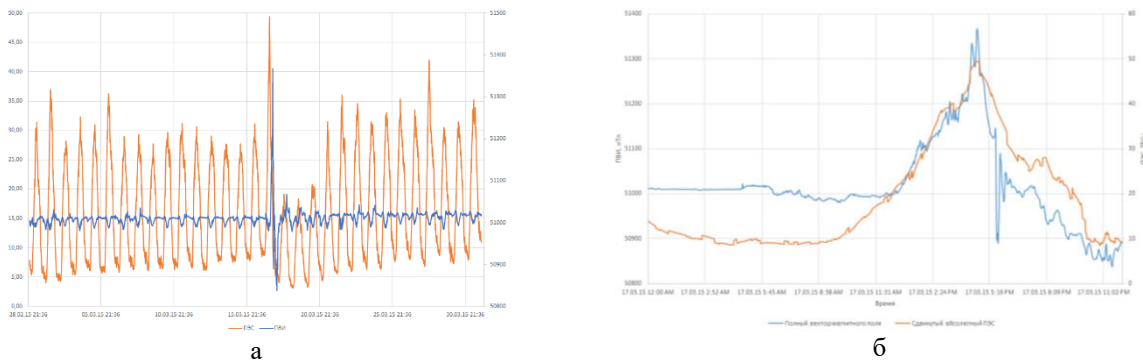


Рисунок 3 – Взаимосвязь ПВИ магнитного поля: а) исходные ПВИ и ПЭС; б) исходный ПВИ и смещенная копия ПЭС за 17 марта 2015 г.

Полученные результаты показывают взаимосвязь между величинами ПЭС и ПВИ. При этом рост ПЭС предшествуют на несколько часов росту ПВИ, что может позволить предсказывать изменения магнитного поля по данным ПЭС и представляет интерес для мониторинга ситуации вокруг критически важных объектов, таких как АЭС, ЛЭП и т.д.

#### Список литературы

1. Куницын В. Е. Радиотомография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко, Е. С. Андреева. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.
2. Hofmann-Wellenhof В. Global Positioning System: Theory and Practice / В. Hofmann-Wellenhof, Н. Lichtenegger, J. Collins. – New York: Springer-Verlag Wien, 1992. – 327 p.
3. Афраймович Э. Л. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э. Л. Афраймович, Н. П. Первалова. – Иркутск: ГУ НИЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.

# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<b>Секция 1.</b>	
<b>ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ И СПЕКТРОСКОПИИ .....</b>	<b>3</b>
<u>Астафьев А.Л., Воеводина М.А., Зверев Д.А., Снигирев А.А.</u> <b>ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИЙ ДЕТЕКТОР ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	<b>4</b>
<u>Тиванов М.С., Байко Д.С., Ляшенко Л.С., Разыков Т.М.</u> <u>Кучкаров К.М., Эргашев Б.А., Олимов А.Н.</u> <b>ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК <math>Sb_2(Se_{1-x}, S_x)_3</math>, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКОВОГО ОСАЖДЕНИЯ .....</b>	<b>5</b>
<u>Баркова А.В., Джунг А.</u> <b>СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ КОЖИ И ПОДКОЖНЫХ ТКАНЕЙ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ИХ ГИДРАТАЦИЮ И ПАРАМЕТРЫ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВΟΣНАБЖЕНИЯ ...</b>	<b>8</b>
<u>Баркова А.В., Лебедевский А.В., Савончик Ю.О.</u> <b>АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПЕКТРОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛАСТИЧНОСТИ СОСУДОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ .....</b>	<b>10</b>
<u>Белько Н.В., Мальтанова А.М., Луговский А.П., Гурский А.Л., Позняк С. К., Самцов М.П.</u> <b>ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕНСОРА НА ОСНОВЕ СПИРОЦИКЛИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДНОГО РОДАМИНА Б .....</b>	<b>12</b>
<u>Белько Н.В., Мальтанова А.М., Луговский А.П., Позняк С.К., Самцов М.П.</u> <b>ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНА В МОЛЕКУЛАХ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВЫХ КРАСИТЕЛЕЙ .....</b>	<b>14</b>
<u>Бобкова Е.Ю., Василевская Л.Н., Васильева В.С., Ксенофонтов М.А., Шкредова Н. А.</u> <b>ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И НАПОЛНИТЕЛЕЙ .....</b>	<b>16</b>
<u>Бородавченко О.М., Живулько В.Д., Мудрый А.В., Якушев М.В.</u> <b>ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ПРЯМОЗОННОГО СОЕДИНЕНИЯ <math>CuInSe_2</math> ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ .....</b>	<b>19</b>
<u>Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Самцов М.П., Тарасов Д.С., Радько А.Е., Шевченко К.А., Кирсанов А.А.</u> <b>ЛАЗЕРНЫЙ АТОМНО-ЭМИССИОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР С АХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ВНЕОСЕВЫХ ПАРАБОЛОИДОВ .....</b>	<b>22</b>
<u>Войтович А.П., Калинов В.С., Костик О.Е.</u> <b>СПЕКТРЫ И ИНТЕНСИВНОСТЬ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФТОРИДА ЛИТИЯ .....</b>	<b>24</b>



<u>Коблов И.В., Каскех В., Кравченко И.Е., Зорина Т.Е., Зорин В.П.</u> <b>СПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИССОЦИАЦИИ ТЕМОПОРФИНА ИЗ КОМПЛЕКСОВ ВКЛЮЧЕНИЯ С ПОЛИМЕРНЫМ ЦИКЛОДЕКСТРИНОМ В ВОДНОМ РАСТВОРЕ .....</b>	27
<u>Козодоев С.В., Мухаммад А.И., Гайдук П.И.</u> <b>ЗАВИСИМОСТЬ ИК ПОГЛОЩЕНИЯ СТРУКТУР Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ti/Au/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ОТ ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ Ti/Au СЛОЁВ.....</b>	30
<u>Kolchevskaya I.N., Dudchik Yu.I., Kolchevsky N.N.</u> <b>OBJECT BOUNDARIES DETECTION USING DIFFERENCE IMAGE METHOD .....</b>	33
<u>Кольчевская И.Н., Кольчевский Н.Н.</u> <b>МЕТОД ЦВЕТОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ.....</b>	35
<u>Кугейко М.М., Лебедевский А.В., Котова К.В., Тукач В.А.</u> <b>НЕИНВАЗИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ САТУРАЦИИ ГЕМОГЛОБИНА АРТЕРИАЛЬНОЙ И ВЕНОЗНОЙ КРОВИ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА .....</b>	37
<u>Кугейко М.М., Радчикова В.С.</u> <b>ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОТКАНЕЙ .....</b>	40
<u>Колодочка П.С., Куликовская П.А., Ходасевич М.А.</u> <b>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА К ГЛАВНЫМ КОМПОНЕНТАМ СПЕКТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ САХАРОВ И ПЛАСТМАСС.....</b>	43
<u>Липский С.А., Романов О.Г.</u> <b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МЕТАЛЛЫ .....</b>	46
<u>Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Гуляева С.И., Юрина О.А.</u> <b>ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ ВТОРЫХ ПОРЯДКОВ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВСС .....</b>	50
<u>Луговский А.П., Пархоменко В.А., Луговский А.А., Тарасов Д.С., Гусаков Г.А., Белько Н.В.</u> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНЬЮГАТОВ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА И КРАСИТЕЛЕЙ СТИРИЛОВОГО, ЦИАНИНОВОГО И ДИЦИАНОМЕТИЛЕНПИРАНОВОГО РЯДОВ .....</b>	52
<u>Мартинюк А.О., Гуляева С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И., Юрина О.А., Смоленцева Л.А.</u> <b>ПРОГРАММНАЯ КОРРЕКЦИЯ УДВОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВСС .....</b>	55
<u>Микитчук Е.П., Железнякова Т.А., Кугейко М.М.</u> <b>ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ПОДЛОЖКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АКТИВНОГО СЛОЯ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА В СОСТАВЕ ФОТОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ .....</b>	58
<u>Мискевич А.А., Лойко В.А., Лойко Н.А., Базылевич В.А., Нестерович Д.Е.</u> <b>ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОНОСЛОЯ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ НА ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА СРЕДОЙ, В КОТОРОЙ ОНИ РАСПРЕДЕЛЕННЫ ....</b>	61

<u>Мухаммад А.И., Гайдук П.И.</u> <b>СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР Si/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si/Al С ОКОШЕЧНЫМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ</b> .....	64
<u>Орлович В.А., Першин С.М., Водчиц А.И., Ходасевич И.А., Гришин М.Я.</u> <b>ОСОБЕННОСТИ ПОПУТНОГО И ОБРАТНОГО ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ В ВОДЕ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПИКОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА</b> .....	67
<u>Osika Y.V., Shundalau M.B.</u> <b>AB INITIO STUDY ON SPECTROSCOPIC AND RADIATIVE PROPERTIES OF THE LOW-LYING STATES OF THE RaAt MOLECULE</b> .....	70
<u>Пилипенко В.А., Омельченко А.А.</u> <b>ОБРАЗОВАНИЕ ФИКСИРОВАННОГО ЗАРЯДА В SiO<sub>2</sub>, ПОЛУЧЕННЫМ ПИРОГЕННЫМ ОКИСЛЕНИЕМ КРЕМНИЯ</b> .....	73
<u>Самцов М.П., Тарасов Д.С., Луговский А.П., Белько Н.В., Воропай Е.С., Петров П.Т., Зильберман Р.Д., Савин А.О.</u> <b>ТРИКАРБОЦИАНИНОВЫЕ КРАСИТЕЛИ ДЛЯ ФОТОТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ</b> .....	76
<u>Самцов М.П., Лабода Н.В., Тарасов Д.С., Белько Н.В., Луговский А.П.</u> <b>СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕТИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ С ТРЕГАЛОЗОЙ</b> .....	79
<u>Самцов М.П., Луговский А.П., Белько Н.В., Тарасов Д.С., Воропай Е.С., Козобкова Н.В., Савицкий А.П., Шлеева М.О.</u> <b>ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ТРЕГАЛОЗОЙ ТРИКАРБОЦИАНИН ДЛЯ ФОТОИНАКТИВАЦИИ МУСОВАСТЕРИУМ SMEGMATIS</b> .....	82
<u>Сердюк В.М.</u> <b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СВЕТОВОГО ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПРЕЛОМЛЕНИЯ</b> .....	84
<u>Скакун В.В., Апанасович В.В.</u> <b>АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧИСЛА ФОТООТСЧЕТОВ В СКАНИРУЮЩЕЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</b> .....	87
<u>Сороковиков М.Н., Зверев Д.А., Баранников А.А., Юнкин В.А., Серегин А.Ю., Волковский Ю.А., Просеков П.А., Снигирёв А.А.</u> <b>УСТРОЙСТВО ДВУМЕРНОЙ ФОКУСИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СОСТАВНЫХ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ ЛИНЗ</b> .....	90
<u>Тарасов Д.С., Самцов М.П., Радько А.Е., Красноперов Н.Н., Шевченко К.А., Воропай Е.С.</u> <b>ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ АНАЛИЗА КИНЕТИКИ ЗАТУХАНИЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРОФЛУОРИМЕТРА</b> .....	93
<u>Тарасов Д.С., Самцов М.П., Луговский А.П., Ощепкова Ю.И.</u> <b>СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНДОТРИКАРБОЦИАНИНОВОГО ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА С БЕЛКАМИ</b> .....	96
<u>Trapenok N.V., Kolchevskay I.N., Kosenko A.D., Mozgalev S.V., Pyatlitski A.N., Dudchik Yu.I., Kolchevsky N.N.</u> <b>LOW PHOTON COUNT IMAGING</b> .....	99

<u>Трапенко Н.В.</u> , Кольчевская И.Н., Косенко А.Д., Мозгалёв С.В., Петлицкий А.Н., Дудчик Ю.И., Кольчевский Н.Н.	
<b>РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА РЕНТГЕНОВСКИХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С НИЗКИМ КОНТРАСТОМ .....</b>	<b>101</b>
<u>Фираго В.А.</u> , Радчикова В.С.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАТАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТКАНЕЙ ЧЕЛОВЕКА И ПАРАМЕТРОВ ИХ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ .....</b>	<b>103</b>
Турьянский А.Г., <u>Чжо Зо Лин</u> , Сенков В.М., Зиятдинова М.З., Куприянов М.Ю., Аксенова М.М.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКИХ МЕТОДОМ ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ К-СКАЧКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОТОПОГЛОЩЕНИЯ КСЕНОНА .....</b>	<b>105</b>
<u>Чудаков Е.А.</u> , Сотский А.Б., Шилов А.В., Парашков С.О.	
<b>РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ СЛОЯ СФОКУСИРОВАННЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ .....</b>	<b>108</b>
<u>Шаронов Г.В.</u> , Шаронов С.Ю.	
<b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНОРАЗМЕРНОЙ АЛМАЗНОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....</b>	<b>111</b>
<u>Шаронов Г.В.</u> , Гасенкова И.В., Гусаков Г.А., Мухуров Н.И.	
<b>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЭКРАНЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И АНТИСТОКСОВЫХ ЛЮМИНОФОРОВ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	<b>114</b>
<u>Шулико К.И.</u> , Лисенкова А.М, Анисько Д.Д.	
<b>ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИИ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ КОНТРОЛЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ .....</b>	<b>117</b>
Юдин Н.Н., Худoley А.Л., Зиновьев М.М., Подзывалов С.Н., Слюнько Е.С., Кузнецов В.С., Городкин Г.Р., <u>Кумейша П.Н.</u> , Лысенко А.Б.	
<b>ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА ZnGeP<sub>2</sub> НА ПОРОГ ЕГО ОПТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ .....</b>	<b>119</b>
<u>Янукович Т.П.</u> , Исмаилова А.С.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА .....</b>	<b>122</b>
<u>Яськов А.С.</u> , Крейдич А.В., Никоненко С.В.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВОГО ЦЕНТРА ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ПАРАЛЛАКСА .....</b>	<b>125</b>
Богданович М.В., Григорьев А.В., Дудиков В.Н., <u>Рябцев Г.И.</u> , Татура П.О., Шпак П.В., Щемелев М.А.	
<b>КОМПАКТНЫЙ МОЩНЫЙ ПИКОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>128</b>

<b>Секция 2.</b>	
<b>ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАТИКИ .....</b>	<b>131</b>
<u>Астапенко Г.Ф., Кучинский П.В., Новик М.И., Ращенья Н.А.</u> <b>БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ЗАЩИЩЕННОГО АРМ АБОНЕНТА .....</b>	<b>132</b>
<u>Астапенко Г.Ф., Кучинский П.В., Ращенья Н.А.</u> <b>ТЕСТИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОКОДЕРОВ MELPe .....</b>	<b>135</b>
<u>Афоненко А.А., Колесников К.Д., Куперштейн Д.П., Лутковский В.М., Окишор А.А., Перл И.А.</u> <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА .....</b>	<b>138</b>
<u>Бранцевич П.Ю.</u> <b>ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ .....</b>	<b>140</b>
<u>Булышко С.Ю., Козлова Е.И.</u> <b>УПРАВЛЕНИЕ ФУНКЦИЯМИ КОМПЬЮТЕРА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ СООБЩЕНИЙ .....</b>	<b>143</b>
<u>Быков С.Н., Козлов В.Л.</u> <b>СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ПО ВИДЕО ИЗОБРАЖЕНИЮ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ПРИ НАЛИЧИИ МАСКИ НА ЛИЦЕ .....</b>	<b>146</b>
<u>Воротницкий Ю.И., Шульган А.К.</u> <b>АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ .....</b>	<b>149</b>
<u>Воротницкий Ю.И., Румас Р.А.</u> <b>АЛГОРИТМ ТСР-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ .....</b>	<b>152</b>
<u>Гулаков В.А., Головатый А.И.</u> <b>УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫМ ДИСПЛЕЕМ ЖЕСТАМИ ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ .....</b>	<b>155</b>
<u>Дедович Н.Н., Романов А.Ф., Ходасевич А.И.</u> <b>БЫТОВОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СЧЕТЧИК ВОДЫ И ТЕПЛА С БЕСПРОВОДНЫМ КАНАЛОМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ .....</b>	<b>158</b>
<u>Дигрис А.В., Вычик П.В., Дувалов Е.И., Скакун В.В., Николайчик Е.А.</u> <b>VacRegDB – БАЗА ДАННЫХ И НАБОР ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАБОТЫ С РЕГУЛЯТОРНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ В БАКТЕРИАЛЬНЫХ ГЕНОМАХ...</b>	<b>161</b>
<u>Жалнерчик А.Д., Козлова Е.И.</u> <b>АНАЛИЗ ФИШИНГОВЫХ СООБЩЕНИЙ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ .....</b>	<b>164</b>
<u>Козлов В.Л., Згировская Н.В.</u> <b>ПРИМЕНЕНИЕ КАРТЫ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОДЛИННОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЯ ФАЛЬСИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ .....</b>	<b>167</b>

<u>Коваленко А.Н., Махнач Н.В., Коваленко Е.И., Сытова С.Н., Черепица С.В.</u> <b>ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЕЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ПОИСКА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ DICOM ФОРМАТА В LIMS ELAB .....</b>	170
<u>Колесников К.Д., Яцков Н.Н., Ковалев О.Ф.</u> <b>АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СХОДСТВА МЕЖДУ ОДНОРОДНЫМИ ОБЛАСТЯМИ НА СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯХ.....</b>	173
<u>Кононович Т.Д., Козлова Е.И.</u> <b>ПОТОКОВАЯ ПЕРЕДАЧА МЕДИАКОНТЕНТА ДЛЯ УДАЛЕННЫХ УСТРОЙСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ .....</b>	176
<u>Лашкин А.А.</u> <b>СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЕ СКРЫТИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ КОММУКАЦИЙ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ .....</b>	179
<u>Липницкий Д.М., Чернявский А.Ф., Садов В.С.</u> <b>ЗАЩИТА ПОЛИГРАФИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ .....</b>	182
<u>Qiu Shifeng, Sadov V. S.</u> <b>AN IMAGE STEGANOGRAPHY ALGORITHM BASED ON CHAOTIC SEQUENCE .....</b>	185
<u>Федосеев В.С., Чернявский А.Ф.</u> <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕПРЕССИВНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО МИМИКЕ ЛИЦА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....</b>	188
<u>Чурило И.Э., Козлова Е.И.</u> <b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО БИОМЕТРИИ ЛИЦА .....</b>	191
<u>Яцков Н.Н., Смолякова Е.В., Скакун В.В., Гринев В.В.</u> <b>ОБНАРУЖЕНИЕ САЙТОВ ОДНОНУКЛЕОТИДНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПОЛИМОРФИЗМА НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИИ .....</b>	194
<u>Мазур С.В., Головатый А.И.</u> <b>КОНТРОЛЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ НАХОЖДЕНИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ .....</b>	197
 <b>Секция 3.</b>	
<b>ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИОФИЗИКИ .....</b>	200
<u>Ботик М.Ф., Заполь Д.А., Микитчук Е.П.</u> <b>НЕЛИНЕЙНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....</b>	201
<u>Говорун К.В., Ермакович О.Л., Лисовский Г.А., Смолковский С.С., Титовицкий И.А.</u> <b>ВЫРАВНИВАНИЕ РАДИАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ В БЛОКЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАДИАИЗОТОПНОГО ПЛОТНОМЕРА .....</b>	204

<u>Гончаров В.К., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю.</u> <b>РЕЖИМЫ НАНЕСЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА .....</b>	206
<u>Грабчиков С.С., Грабчикова Е.А., Зубарь Т.Е., Панасюк М.И., Канафьев О.Д.</u> <b>ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ–ЖЕЛЕЗО .....</b>	210
<u>Гринчук А.П., Кныш В.П., Бакаев А.Г., Шпарло Д.А., Крапчатов А.Н.</u> <b>ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ ТРАДИЦИОННОЙ И ПЕРСПЕКТИВНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....</b>	213
<u>Громыко А.В., Кныш В.П., Алешкевич Н.Н.</u> <b>ЗАДАЧА СИНТЕЗА ОБЛУЧАТЕЛЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН В ПРОСТРАНСТВЕ ВЕКТОРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ .....</b>	216
<u>Демидчик В.И.</u> <b>ИНТЕГРАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ .....</b>	220
<u>Ермакович О.Л.</u> <b>ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА, ПОСРЕДСТВОМ ИЗМЕРЕНИЯ РАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	223
<u>Zhukava M.N., Kolchevskay I.N., Kolchevsky N.N.</u> <b>ELECTRONIC EDUCATIONAL TECHNOLOGIES FOR DEVELOPMENT ALGORITHMIC THINKING IN PHYSICS AND MATHEMATICS .....</b>	226
<u>Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П.</u> <b>АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОВОРОТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	228
<u>Кот В.А.</u> <b>ОБ ОДНОМ ВЫСОКОТОЧНОМ РЕШЕНИИ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....</b>	230
<u>Кот В.А.</u> <b>ВОЛНА МАРШАКА И ФРОНТ ПРОНИКНОВЕНИЯ: ПРОСТЫЕ ВЫСОКОТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ .....</b>	233
<u>Кочергина О.В., Курмашев В.И., Матковская Т.А., Тимошков Ю.В.</u> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛА УТЕЧКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЕНСАЦИОННОГО СПОСОБА, СОЗДАНИЕ ОСНОВ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ .....</b>	236
<u>Кучинский П.В., Лапшин В.А.</u> <b>МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА .....</b>	238
<u>Лапшин В.А.</u> <b>БАЗОВЫЙ МОДУЛЬ УСТРОЙСТВА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ...</b>	241
<u>Малый С.В., Орлова А.С.</u> <b>МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛЕНТ.....</b>	244
<u>Станчик В.В., Бручковский И.И., Литвинович Г.С., Гуляева С.И.</u> <b>АВТОМАТИЗАЦИЯ КАЛИБРОВКИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ПО СПЭЯ .....</b>	246

Сучан О., Лешкевич С.В., Саечников В.А. <b>ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ШИРОКОАПЕРТУРНОЙ АНТЕННЫ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ</b> .....	249
<u>Тимощенко Е.В.</u> , Юревич В.А. <b>МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ МИКРОЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК</b> .....	252
 <b>Секция 4.</b>	
<b>ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ</b> .....	255
 <u>Артюх Е.А.</u> , Суханек Г., Ермакова Е.А. <b>МАГНИТНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ НА ОСНОВЕ <math>Sr_2FeMoO_{6-\delta}</math></b> .....	256
<u>Богатырев Ю.В.</u> <b>НАДЕЖНОСТЬ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ</b> .....	260
<u>Борздов А.В.</u> , <u>Борздов В.М.</u> , Петлицкий А.Н. <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ- РЕКОМБИНАЦИИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В КРЕМНИИ</b> .....	263
<u>Бурмаков А.П.</u> <b>МАГНЕТРОННО-ЛАЗЕРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР</b> .....	266
<u>Бускис К.П.</u> , Кобыляцкий А.В., Ящук В.А., Гременок В.Ф. <b>ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ S/Se НА МИКРОСТРУКТУРУ ТОНКИХ ПЛЕНОК <math>Cu_2Sn(S_xSe_{1-x})_3</math>, ПОЛУЧЕННЫХ ОТЖИГОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ</b> .....	270
<u>Васильева В.С.</u> , <u>Выдумчик С.В.</u> , Гавриленко О.О., Горохов С.Л., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В., Ксенофонтов М.А. <b>АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРЕДИЗОЛИРОВАННЫХ ТРУБ ИЗ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВЫХ СИСТЕМ</b> .....	273
<u>Васильева В.С.</u> , <u>Василевская Л.Н.</u> , Гавриленко О.О., Калашников А.С., Ксенофонтов М.А. <b>СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ</b> .....	276
<u>Воеводина М.А.</u> , Зверев Д.А., Снигирев А.А. <b>РЕНТГЕНОВСКАЯ РЕФЛЕКТО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ</b> .....	278
<u>Волков Ю.О.</u> , Нуждин А.Д., Роцин Б.С., Муслимов А.Э., Толстихина А.Л., Прохоров И.А., Аргунова Т.С., Лебедев С.П., Лебедев А.А., Асадчиков В.Е. <b>МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ШЕРОХОВАТОСТИ РЕЛЬЕФА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ</b> .....	279

<u>Горбачук Н.И.,</u> Поклонский Н.А., Ермакова Е.А., Шпаковский С.В., Ломако В. М.	
<b>DLTS-СПЕКТРОСКОПИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ СТРУКТУРАХ Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/n-Si .....</b>	<b>281</b>
<u>Гурбанович Ад.В.,</u> Гурбанович Ан.В., Липницкий Ф.В.	
<b>УСЛОВИЯ СИНТЕЗА И КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ЗАМЕЩЕНИЯ Sb<sub>2-x</sub>M<sub>x</sub>Te<sub>3</sub>, (M- Cr, Fe; 0 ≤ x ≤ 0,15) .....</b>	<b>284</b>
<u>Гурский А.Л.,</u> Касич А., Будько А., Луговский А.П., Луговский А.А., Лапаник В.И., Тимофеев С.В.	
<b>ПРИГОТОВЛЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЖИТКИХ КРИСТАЛЛОВ И НАНОГЛИНЫ, ЛЕГИРОВАННОЙ ХИРАЛЬНОЙ ЧЕТВЕРТИЧНОЙ АММОНИЕВОЙ СОЛЮ .....</b>	<b>286</b>
<u>Гусаков Г.А., Шаронов Г.В.,</u> Баран Л.В.	
<b>ТОНКАЯ ПОЛИРОВКА ПОВЕРХНОСТИ ШПИНЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА .....</b>	<b>288</b>
<u>Жданович Д.Н.,</u> Ластовский С.Б., Макаренко Л.Ф., Маркевич В.П., Огородников Д.А.	
<b>ОТЖИГ ПОД ОБРАТНЫМ СМЕЩЕНИЕМ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДНЫХ n<sup>+</sup>-p-СТРУКТУР, ОБЛУЧЕННЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ .....</b>	<b>291</b>
<u>Жевняк О.Г.,</u> Борздов А.В., Борздов В.М.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ФОРМУ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ .....</b>	<b>294</b>
<u>Живулько В.Д.,</u> Мудрый А.В., Бородавченко О.М., Павловский В.П., Луценко Е.В., Яблонский Г.П., Якушев М.В.	
<b>ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПОГЛОЩАЮЩИХ СЛОЕВ Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....</b>	<b>297</b>
<u>Пилюпенко В.А.,</u> Ковальчук Н.С., <u>Жигулин Д.В.,</u> Шестовский Д.В., Анищик В.М., Понарядов В.В.	
<b>ФОРМИРОВАНИЕ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА АЛЮМИНИЙ – ПОЛИКРЕМНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЛИТЕЛЬНОГО И БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГОВ .....</b>	<b>300</b>
<u>Казючиц Н.М.,</u> Казючиц В.Н., Русецкий М.С., Королик О.В., Дубинина А.А.	
<b>РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА НРНТ АЛМАЗАХ .....</b>	<b>303</b>
<u>Каланда Н.А.,</u> Ярмолич М.В., <u>Петров А.В.,</u> Сонных А.Д., Голосов Д.А., Завадский С.М., Свито И.А.	
<b>ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИН ТРАНСПОРТНЫХ ТОКОВ НА ВОЛЬТ- АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + 0,01 Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР.....</b>	<b>306</b>
<u>Каланда Н.А.,</u> Ярмолич М.В., <u>Петров А.В.,</u> Сонных А.Д., Голосов Д.А., Завадский С.М., Семченко А.В.	
<b>ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ВЕЛИЧИН ТРАНСПОРТНЫХ ТОКОВ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХФАЗНЫХ КОМПОЗИТОВ YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> + 0,07 Bi<sub>0,2</sub>Y<sub>2,8</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12-δ</sub> В ТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ .....</b>	<b>309</b>



<u>Коваленко М.О., Углов В.В.</u> <b>РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Hf-Nb-Zr-Ti К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ИОНАМИ ГЕЛИЯ</b> .....	312
<u>Komarov F.F., Vlasukova L.A., Milchanin O.V., Kuchinski P.V., Alzhanova A.E., Berencén Y., Wang T., Zhussupbekov K., Zhussupbekova A.</u> <b>INFRARED INTERBAND ABSORPTION IN SILICON HYPERDOPED WITH SELENIUM BY ION IMPLANTATION WITH SUBSEQUENT PULSED LASER ANNEALING</b> .....	315
<u>Комаров Ф.Ф., Мильчанин О.В., Моховиков М.А., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н., Wendler E.</u> <b>ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ In И As.....</b>	318
<u>Комаров Ф.Ф., Власукова Л.А., Мильчанин О.В., Пархоменко И.Н., Романов И.А., Мудрый А.В., Wendler E., Žuk J.</u> <b>ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ</b> .....	322
<u>Кондрусь И.В., Углов В.В.</u> <b>РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА NiCoFeCrMn К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОБЛУЧЕНИЮ ИОНАМИ ГЕЛИЯ</b> .....	325
<u>Константинов С.В., Комаров Ф.Ф., Чижов И.В., Зайков В.А.</u> <b>ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ КРЕМНИЯ НА ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ ПОКРЫТИЙ TiAlSiN, TiAlSiCN.....</b>	328
<u>Корякин С.В., Михалёнок Е.В.</u> <b>ПРЕДЭПИТАКСИАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ПОДЛОЖЕК GaAs ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ СВЧ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ</b> .....	331
<u>Корякин С.В., Михалёнок Е.В., Шарко С.А.</u> <b>ИММОБИЛИЗАЦИЯ ГЛЮКОЗОКСИДАЗЫ В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНКАХ</b> .....	334
<u>Кулешов А.К., Углов В.В., Русальский Д.П., Колесникова Е.А.</u> <b>ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1,5 МэВ.....</b>	337
<u>Ласковнев А.П., Маркевич М.И., Анисович А.Г., Журавлева В.И., Подшивалов Ю.В.</u> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ И ЦИРКОНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.....</b>	340
<u>Липатьева Т.О., Федотов С.С., Липатьев А.С., Каратеев И.В., Сигаев В.Н.</u> <b>ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МОНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА ДЛЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ</b> .....	343
<u>Маркевич М.И., Журавлева В.И., Анисович А.Г., Жигулин Д.</u> <b>ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ Ni МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ</b> .....	345

<u>Мискевич С.А., Комаров А.Ф., Комаров Ф.Ф., Ювченко В.Н., Ермолаев А.П., Богатырёв Ю.В., Заяц Г.М.</u> <b>РАСЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ</b> .....	348
<u>Михасёв Р.Н., Белов М.М., Иваницкий К.В.</u> <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ КРИПТОНА НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ СИСТЕМЫ V-Nb-Ta-Ti</b> .....	351
<u>Feranchuk I.D., Skoromnik O.D., Nguyen Quang San</u> <b>SUPERRADIANT PARAMETRIC X-RAY EMISSION</b> .....	354
<u>Нуждин А.Д., Волков Ю.О., Рошин Б.С., Асадчиков В. Е., Тихонов А.М.</u> <b>ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ЧАСТИЧНО УПОРЯДОЧЕННЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПЛЁНОК НА ЖИДКОФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА</b> .....	357
<u>Огородников Д.А., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Лемешевская А.М., Цымбал В.С.</u> <b>ВЛИЯНИЕ ГАММА-КВАНТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ SiFЭУ С ОПТИЧЕСКИ ИЗОЛИРОВАННЫМИ ЯЧЕЙКАМИ P<sup>+</sup>-N-N<sup>+</sup>-ТИПА</b> .....	360
<u>Поклонский Н.А., Аникеев И.И., Вырко С.А.</u> <b>МОДЕЛЬ ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ</b> .....	363
<u>Полонский Н.В., Лобанок М.В., Гайдук П.И.</u> <b>ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ SiC НА СТРУКТУРАХ ПОЛИ-Si/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si ..</b>	366
<u>Поляков А.В., Ксенофонтов М.А.</u> <b>ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА</b> .....	369
<u>Сиротюк А.С., Баглов А.В., Хорошко Л.С.</u> <b>ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА ПЕРОВСКИТНОГО ОРТОАЛЮМИНАТА НЕОДИМА В ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ОТКРЫТОГО ОСТОВА</b> .....	372
<u>Стаськов Н.И., Лашковская Е.И., Гапоненко Н.В., Корнилова Ю.Д., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Чудаков Е.А., Сотский А.Б., Сотская Л.И., Бойко А.А., Семченко А.В.</u> <b>РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭРБИЯ ПО ТОЛЩИНЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК ТИТАНАТА БАРИЯ</b> .....	375
<u>Степанов А.А., Смирнов А.Г.</u> <b>ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ INGAZNO</b> .....	378
<u>Стогний А.И., Серокурова А.И., Новицкий Н.Н.</u> <b>СТОЙКОСТЬ ПЛЕНОЧНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР Be/BeO, Al/AIO<sub>x</sub> К РАСПЫЛЕНИЮ МЕДЛЕННЫМИ ИОНАМИ O<sup>+</sup>: МАСКИ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ ГЛУБОКОГО АНИЗОТРОПНОГО ТРАВЛЕНИЯ</b> .....	381
<u>Столяр И.А., Ташлыкова-Бушкевич И.И., Шепелевич В.Г.</u> <b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Mg-Cu</b> .....	384

Филиппов В.В., Семченко А.В., Грапов Д.В., Сидский В.В., Маевский А.А., Данильченко К.Д.	
<b>СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ТАНТАЛАТА СТРОНЦИЯ .....</b>	<b>387</b>
<u>Шепелевич В.Г., Гольцев М.В., Белая О.Н., Чижикова А.С., Шилько В.М.</u>	
<b>ВЫДЕЛЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОДЫ С БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИМ СПЛАВОМ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО ЛОМА И ВИСМУТА .....</b>	<b>390</b>
<u>Шмарловский А.В., Карпович И.А.</u>	
<b>МОДИФИКАЦИЯ ФЕРРОСУЛЬФАТНОГО ДОЗИМЕТРА .....</b>	<b>393</b>
Шохонов Д.А., Луценко Е.В.	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ NORMALY-OFF НЕМТ-ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGa<sub>N</sub>/AlN/GaN .....</b>	<b>396</b>
<u>Ювченко В.Н., Комаров А.Ф., Мискевич С.А., Ермолаев А.П.</u>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ .....</b>	<b>399</b>
Р.Х.Рахимов, Р.С. Горлач, В.В.Паньков, В.П.Ермаков	
<b>МАСШТАБИРУЕМЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДАЛЬНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА .....</b>	<b>402</b>
<u>Лапаник В.И., Тимофеев С.Н.</u>	
<b>СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЖК МОДУЛЯТОР, УСТОЙЧИВЫЙ К МЕХАНИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ .....</b>	<b>405</b>
Лапаник В.И., Тимофеев С.Н.	
<b>КАПСУЛИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРОМ ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ С НИЗКИМ ЗНАЧЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>408</b>
 <b>Секция 5.</b>	
<b>АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ДЗЗ .....</b>	<b>411</b>
 <u>Баранова В.С., Спиридонов А.А., Евчик В.Е., Черный В.Е., Шалатонин И.А., Лешкевич С.В., Ушаков Д.В., Саечников В.А.</u>	
<b>ВСЕНАПРАВЛЕННОЕ СКАНИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СВЕРХМАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....</b>	<b>412</b>
<u>Beglik V.V., Ohrymenko I.P., Kolchevskay I.N., Kolchevsky N.N.</u>	
<b>GRAVITY DETECTOR BASED ON CONSTELLATION OF SATELLITES .....</b>	<b>415</b>
<u>Бриль А.А., Лупян Е.А., Бурцев М.А.</u>	
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПРОДУКТОВ КОМПОЗИТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МАЛЫМ ГАЗОВЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ .....</b>	<b>417</b>
<u>Волкова Е.Е., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Бурцев М.А.</u>	
<b>УТОЧНЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ ПРИБОРА МСУ-МР КА «МЕТЕОР-М» №2-2 .....</b>	<b>420</b>

Голубев Ю.В., <u>Ивуть П.В.</u> , Ломако А.А., Хомицевич А.Д., Домарацкий А.В. Беляев Б.И. Сосенко В.А.	
<b>ВЫСОТНЫЙ КАЛИБРОВОЧНЫЙ ПУНКТ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СПУТНИКОВЫХ СЕНСОРОВ И ВАЛИДАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ</b> .....	422
<u>Гуторов А.В.</u> , Беляев Б.И., Бручковский И.И., Голубев Ю.В., Домарацкий А.В., Ивуть П.В., Литвинович Г.С., Сосенко В.А., Хомицевич А.Д., Щербаков Н.Г.	
<b>РАЗРАБОТКА СПЕКТРОСИНТЕЗАТОРА ДЛЯ ИМИТАТОРА КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЗЗ</b> .....	424
<u>Демко В.М.</u> , Зайцева В.Ю.	
<b>КОВАРИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЭС НА ПЕРЕМЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ</b> .....	426
<u>Евчик В.Е.</u> , Ушаков Д.В., Спиридонов А.А., Баранова В.С., Саечников В.А.	
<b>СТАНЦИИ ПРИЕМА ТЕЛЕМЕТРИИ С ВРЕМЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ЭКСПРЕСС АНАЛИЗА ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАНО- И ПИКО- СПУТНИКОВ</b> .....	429
<u>Зайцева А.П.</u> , Топаз А.А., Шестаков Н.А.	
<b>МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ ЗАТОПЛЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ</b> .....	431
<u>Ивуть П.В.</u> , Ломако А.А., Голубев Ю.В., Хомицевич А.Д., Сосенко В.А.	
<b>СТАЦИОНАРНЫЙ БЛОК СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЪЁМКИ НА БАЗЕ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ</b> .....	433
<u>Kolchevsky N.N.</u> , Dudchik Yu.I., Kolchevskaya I.N., Zhukava M.N.	
<b>FLYING MEASURING STATION BASED ON DRONE DJI PHANTOM</b> .....	435
<u>Лозин Д.В.</u> , Лупян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Стыщенко Ф.В.	
<b>МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ПИРОГЕННОЙ ГИБЕЛИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРЕНИЯ ПОЖАРОВ</b> .....	437
<u>Ломако А.А.</u> , Катковский Л.В., Давидович Ю.С.	
<b>ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</b> .....	440
<u>Ломако А.А.</u> , Ивуть П.В., Гуторов А.В., Щербаков Н.Г.	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ АЭРОФОТОСИСТЕМ В ЛЕТНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ</b> .....	443
<u>Мальшев В.Б.</u> , Фомин Б.Н., Беляев Ю.В., Гуляева С.И.	
<b>СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАНДШАФТОВ ВУЛКАНА КСУДАЧ, ЮЖНАЯ КАМЧАТКА</b> .....	446
<u>Олехнович Е.А.</u> , Прокопович И.П.	
<b>РЕФРАКЦИЯ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЫСОТ И АЗИМУТАЛЬНЫХ УГЛОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА</b> .....	449
<u>Поляков А.В.</u> , Волчанина Е.В.	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОВОЛОКОННОГО КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ РЕШЕТОК БРЭГГА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ</b> .....	451
<u>Поляков А.В.</u> , Юдыцкая К.С.	
<b>УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОПТОВОЛОКОННОЙ БУФЕРНОЙ ПАМЯТЮ В СИСТЕМАХ ЛАЗЕРНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ</b> .....	453

<u>Силюк О.О., Катковский Л.В., Мартинов А.О.</u> <b>АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ</b> .....	455
<u>Спиридонов А.А., Баранова В.С., Черный В.Е., Евчик В.Е., Шалатонин И.А., Лешкевич С.В., Ушаков Д.В., Саечников В.А.</u> <b>ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА</b> .....	457
<u>Шапкин А.С., Потапов К.О.</u> <b>АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕЁ СВЯЗЬ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ</b> .....	460