

данных с соответствующими температурными измерениями с помощью термодар. Выращенные трубки монокристаллического кремния малого диаметра имеют нужные размеры и обладают надлежащими электрофизическими свойствами для изготовления на их основе силовых полупроводниковых приборов по непланарной технологии.

Компьютерное моделирование выполнено по теме государственного задания ИПМех РАН (№ государственной регистрации АААА-А20-120011690136-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Silicon furnace components for microelectronic applications fabricated from shaped silicon tubes / A.A. Alioshin [и др.] // *J. Crystal Growth* — 1990. — V. 104, № 1. — P. 130—135.
2. Analysis of thermostress state in silicon tubes during its melt growing / A.A. Alioshin, I.D. Epimakhov, I.V. Panfilov, A.I. Prostomolotov // *Single Crystal Growth and Heat&Mass Transfer: Fourth Int. Conf., Obninsk (Russia), 24-28 sept. 2001.* — V. 3. P. 680—688.
3. Wijaranakula, W. A. Real-time simulation of point defect reactions near the solid and melt interface of a 200 mm diameter Czochralski silicon crystal / W. A. Wijaranakula // *J. Electrochem. Soc.* — 1993. — V. 140, № 11. — P. 3306—3316.
4. Приборы и технология на основе непланарного кремния / Л.В. Кожитов, Т.Т. Кондратенко, В.В. Крапучин, Т.Я. Кондратенко // *Новые материалы.* — М.: МИСиС, 2002. — С. 15—184.
5. Перспективные технологии и оборудование для материаловедения, микро- и нанoeлектроники / Л.В. Кожитов // *Труды IV Междунар. сем. — Астрахань: АГУ. 20-23 мая 2006 г.* — С. 30—31.
6. Способ выращивания полых цилиндрических монокристаллов Si на основе метода Чохральского и устройство для его осуществления / Л.В. Кожитов [и др.] // *Патент РФ.* — 2007. № 2355831. — 10 с.
7. Получение профильных монокристаллов кремния трубчатой формы / А.П. Блиев [и др.] // *Фундаментальные исследования: техн. науки* — 2007. — № 12 (часть 3). — С. 519—520.
8. Гаража, Е. В. Конвективный массоперенос в расплаве при выращивании кристаллов методом Чохральского / Е. В. Гаража, Е. Н. Тумаев // *Реология и физ.-хим. механика гетерофаз. систем: IV конф. мол. уч.* — М.: МГУ. 22-24 июня 2015 г. — С. 107—108.
9. Боуэн, Б.К. Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография / Б.К. Боуэн, Д.К. Таннер. — СПб.: Наука, 2002. — 280 с.
10. Вerezub, N. A. Механика процессов выращивания и термообработки монокристаллического кремния / Н. А. Вerezub, А. И. Prostomolotov // *Изв. РАН: МТТ.* — 2020. — № 5. — С. 51—63.
11. Prostomolotov, A. Crystmo/Net remote access code for Czochralski crystal growth modelling / A. Prostomolotov, N. Ilyasov, N. Verezub // *Science and Technology.* — 2013. — V. 3, № 2A. — P. 18—25.

ОЦЕНКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

М. С. Русецкий¹, Н. М. Казючиц¹, В. Н. Казючиц¹, В. И. Антонов²

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: rusetsky@bsu.by*

²⁾ *Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: antonov@atomtex.com*

Проведено сравнение сцинтилляционных свойств синтезированного методом высоких давлений и высоких температур (НРНТ) алмаза и промышленного сцинтиллятора на основе ZnS:Ag. Световой выход сцинтилляций от α -частиц в алмазах примерно в 3 раза меньше, чем в ZnS:Ag. Оцененное время затухания люминесценции в

алмазах менее 130 нс, в то время как в ZnS:Ag кривая затухания содержит быструю и медленную компоненты с временем высвечивания около 0.2 мкс и 2 мкс, соответственно.

Ключевые слова: синтетический HPHT алмаз; сцинтиллятор; спектрометрия α -частиц.

ESTIMATION OF SCINTILLATION CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC DIAMOND CRYSTALS

M. S. Rusetsky¹, N. M. Kazuchits¹, V. N. Kazuchits¹, V. I. Antonov²

¹ *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

² *«ATOMTEX» SPE, Minsk, Belarus*

Corresponding author: M. S. Rusetsky (rusetsky@bsu.by)

The scintillation properties of single crystals of synthetic HPHT diamond and an industrial scintillator based on ZnS:Ag are compared. The light output of scintillations from α -particles in diamonds is about 3 times less than in ZnS:Ag. The estimated luminescence decay time in diamonds is less than 130 ns, while the decay curve in ZnS:Ag contains fast and slow components with a decay time of about 0.2 μ s and 2 μ s, respectively.

Key words: synthetic HPHT diamond; scintillator; α -particle spectrometry.

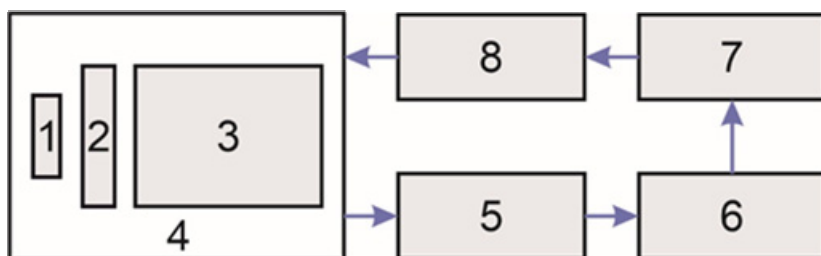
ВВЕДЕНИЕ

Интерес к использованию алмаза в качестве сцинтилляционного материала обусловлен его высокой радиационной стойкостью, которая, в свою очередь определяется большой величиной пороговой энергии дефектообразования, около 50 эВ [1]. Кроме того, время затухания люминесценции большинства центров в алмазе находится в диапазоне от единиц до десятков наносекунд [2], что позволит получать короткие сцинтилляционные импульсы. К достоинствам алмаза так же можно отнести большое количество центров люминесценции в видимой и инфракрасной областях спектра, которые находятся в диапазоне высокой чувствительности вакуумных или твердотельных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) [3].

Цель работы – сравнение сцинтилляционных свойств монокристаллов синтетического HPHT алмаза и промышленного сцинтиллятора на основе ZnS:Ag.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования сцинтилляционных свойств алмазов была создана экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рисунке 1. В экспериментах использовался слабоактивный источник α -частиц на основе Pu²³⁹ с энергией 5.2 МэВ и сопутствующим γ -излучением с энергией в диапазоне от 50 до 400 кэВ. Сцинтиллятор располагался в воздушной среде на диафрагме диаметром 3 мм на расстоянии 1 мм от источника α -частиц. Наличие воздушного (не вакуумного) зазора между сцинтиллятором и источником α -частиц существенно ухудшает энергетическое разрешение системы. Однако, поскольку образцы алмаза являются неоднородными [4, 5] и, как следствие, не могут обеспечить хорошего энергетического разрешения, это обстоятельство не является критически важным и позволяет упростить методику экспериментов.



1 – источник α -частиц (Pu^{239}), 2 – сцинтиллятор, 3 – фотоприемник (ФЭУ-79), 4 – защитный кожух, 5 – усилитель-формирователь импульсов, 6 – амплитудный анализатор АТ1315, 7 – компьютер, 8 – блок питания ФЭУ

Рисунок 1. Блок-схема экспериментальной установки для регистрации энергетического спектра α -частиц

Для регистрации амплитудного спектра α -частиц использовался промышленный 1024 каналный анализатор АТ1315 производства УП «АТОМТЕХ». Форма импульса на выходе усилителя-формирователя регистрировалась цифровым осциллографом Tektronix TDS2022C с шириной полосы 200 МГц. Для оценки быстродействия регистрирующей системы на ФЭУ подавалось излучение импульсного лазера ЛГИ-21 длительностью 10 нс. При этом на выходе усилителя наблюдался электрический импульс длительностью около 130 нс на полувысоте, что составляло предельное быстродействие системы.

В экспериментах использовали полированные пластины синтетического НРНТ алмаза толщиной 350–500 мкм, вырезанные из кристаллов сходного дефектно-примесного состава. Пластины подвергались быстрому термобарическому отжигу при температурах 1900, 2100, 2300, 2500 и 2700 °С [6]. Под действием отжига в алмазах формировались дополнительные центры излучательной рекомбинации, образование которых фиксировали методом катодolumинесценции (КЛ). Спектры КЛ регистрировали в спектральном диапазоне 200-900 нм с разрешением 0.2 нм при температуре жидкого азота. Энергия возбуждающих КЛ электронов составляла 10 кэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2, а показаны спектры КЛ пластин алмаза после отжига при разных температурах. Как видно из рисунка, увеличение температуры отжига сопровождается перестройкой структуры спектров и увеличением интегральной интенсивности КЛ. Так по мере увеличения температуры отжига последовательно увеличивается интенсивность узких бесфонных линий с длинами волн 575 нм (NV^0 -центр), 503 нм (N3-центр) и 415 нм (N3-центр). В структуру этих центров входят один, два и три атома азота, соответственно [2]. Таким образом, перестройка структуры спектров отражает процессы агрегации азота и формирование все более сложных азот-вакансионных центров люминесценции при отжиге. Спектральное положение этих центров находится в диапазоне высокой чувствительности ФЭУ-79, которая показана на рисунке 2, б.

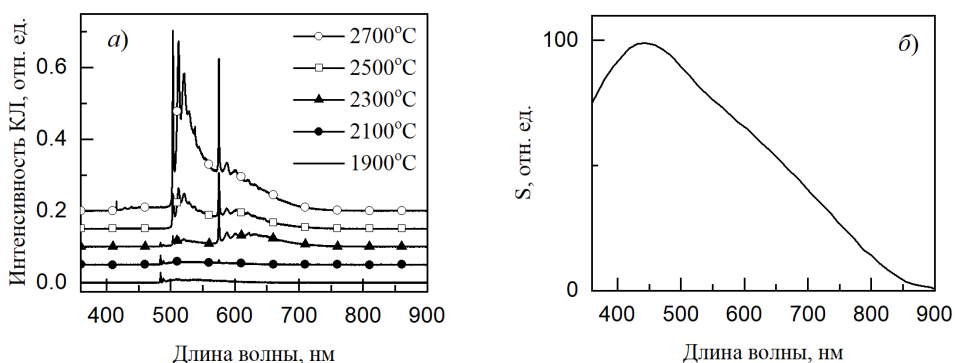


Рисунок 2. Спектры КЛ образцов алмаза после отжига (а) и спектральная чувствительность ФЭУ-79 (б)

Для оценки сцинтилляционных свойств регистрировались энергетическое распределение α -частиц и форма импульсов сцинтилляции, полученные с использованием образца алмаза с наибольшей интенсивностью КЛ и образца ZnS:Ag. Все прочие условия эксперимента сохранялись одинаковыми. Результаты сравнения показаны на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, а, в обоих случаях наблюдалось низкое энергетическое разрешение, что связано с проведением измерений на воздухе и отсутствием коллимации потока α -частиц. Тем не менее, энергетические распределения позволяют оценить световой выход сцинтилляторов по величине максимальной амплитуды сцинтилляций в энергетическом спектре. Максимальные значения сигналов для алмазного и ZnS:Ag сцинтилляторов соответствуют 350 и 935 каналам, соответственно. Таким образом, величина светового выхода в алмазном сцинтилляторе примерно в 3 раза меньше, чем в промышленном сцинтилляторе на основе ZnS:Ag.

На рисунке 3, б, показаны осциллограммы импульсов, полученных от сцинтилляторов и лазерного импульса длительностью 10 нс. Ширина лазерного импульса на полувысоте составляет 130 нс, что является временным разрешением использованной измерительной системы. Ширина импульса от алмазного сцинтиллятора с точностью до погрешности измерения совпадает с шириной лазерного импульса, из чего следует, что характерное время затухания люминесценции в НРНТ алмазах не превышает 130 нс.

Импульс от сцинтиллятора ZnS:Ag состоит из двух компонент – быстрой, с временем высвечивания около 200 нс и медленной, с временем высвечивания порядка 2 мкс. На медленном крыле импульса содержится значительное число флуктуаций небольшой амплитуды, которые регистрируются как шумовые.

Спектры КЛ, показанные на рисунке 2, возбуждались низкоэнергетическими электронами т.е. β -излучением. Взаимодействие α -частиц с веществом сцинтиллятора носит сходный характер, но не является эквивалентным взаимодействию с электронами. Вследствие этого, спектры КЛ могут отличаться от спектров, возбуждаемых α -частицами (ионолюминесценции – ИЛ), регистрация которых является достаточно сложным и затратным экспериментом.

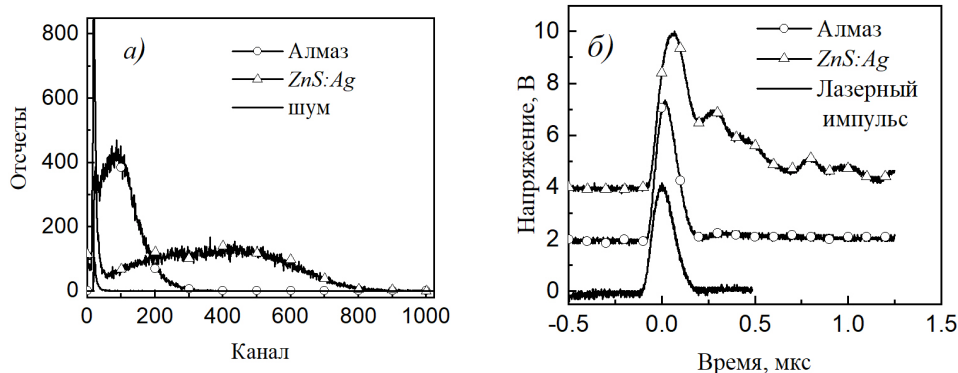


Рисунок 3. Энергетические распределения α -частиц (а) и форма импульса (б), полученные с использованием алмазного и ZnS:Ag сцинтилляторов

Для оценки соответствия спектров КЛ спектрам ИЛ энергетические спектры α -частиц, показанные на рисунке 4, а, регистрировались с использованием алмазных сцинтилляторов, отожженных при различных температурах.

Плохое энергетическое разрешение в этих спектрах не позволяло наблюдать узкой линии, по положению которой на оси «Канал» можно было бы оценить световой выход сцинтилляторов. Поэтому для таких оценок использовались максимальные регистрируемые сигналы в спектре. Максимальные регистрируемые сигналы определялась путем аппроксимации спадающего крыла энергетического спектра экспоненциальной зависимостью и ее экстраполяцией к единичному значению. Зависимость максимальной амплитуды сцинтилляций в энергетическом спектре от интегральной интенсивности спектра, показана на рисунке 4, б. Как видно из этого рисунка, значения максимальной амплитуды сцинтилляций прямо пропорциональны интенсивности сигналов КЛ. Из этого факта следует ожидать близкую структуру спектров КЛ и ИЛ.

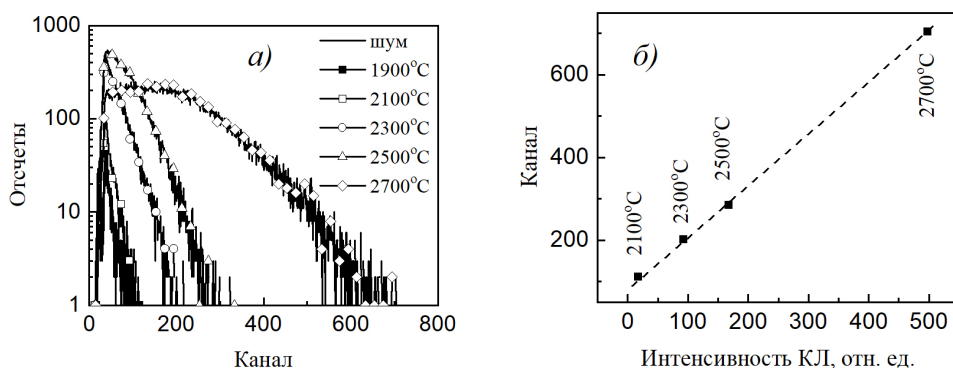


Рисунок 4. Энергетические распределения α -частиц, полученные с использованием отожженных при различных температурах алмазных сцинтилляторов (а), зависимость максимальной амплитуды сцинтилляций в спектре α -частиц от интегральной интенсивности КЛ (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что световой выход сцинтилляций от α -частиц в синтетических НРНТ алмазах приблизительно в 3 раза меньше, чем в промышленных сцинтилляторах на основе ZnS:Ag. Время затухания люминесценции в алмазных сцинтилляторах меньше 130 нс, в то время как для ZnS:Ag оно составляет не менее 200 нс. Таким образом алмазный сцинтиллятор уступает ZnS:Ag сцинтиллятору по световому выходу, но превосходит его по быстрдействию.

Быстрый термобарический отжиг при высоких температурах приводит к формированию азот-вакансионных центров люминесценции в алмазе, что может быть использовано для увеличения светового выхода алмазных сцинтилляторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Saada D. Transformation of Diamond (sp³) to Graphite (sp²) Bonds by Ion-Impact / D. Saada, J. Adler, R. Kalish // International Journal of Modern Physics C. – 1998. – Vol. 09, № 01 – P. 61-69.
2. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook, 1–3 Springer-Verlag Berlin Heidelberg // New York. – 2001. – 502 p.
3. Creation and nature of optical centres in diamond for single-photon emission – overview and critical remarks / S. Pezzagna [et al.] // New Journal of Physics. – 2011. – Vol. 13. – №. 3. – P. 035024.
4. Влияние условий синтеза на примесный состав монокристаллов алмаза марки СТМ «Алмазот» / Н.М Казючиц [и др.] // Неорганические материалы. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 1449–1461.
5. Lateral scan profiles of the recombination parameters correlated with distribution of grown-in impurities in НРНТ diamond / E. Gaubas [et al.] // Diamond and Related Materials. – 2014. – Vol. 47. – P. 15–26.
6. Rapid НРНТ annealing of synthetic Ib-type diamonds / V.N. Kazuchits [et al.] // Carbon. – 2021. – Vol. 174. – P. 180–189.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ВЛАЖНОСТИ ПЛЕНОК ОКСИДОВ ОЛОВА: ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДНЫХ ВАКАНСИЙ

М. А. Самарина, В. К. Ксенович, Д. В. Адамчук, В. А. Доросинец

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,
e-mail: ksenevich@bsu.by*

Исследованы кинетики изменения электропроводности пленок оксидов олова различного структурного совершенства и с разной концентрацией кислородных вакансий в результате процессов адсорбции-десорбции водяных паров на их поверхности в диапазоне значений относительной влажности 0–85%. Обнаружено, что на знак и величину изменения сопротивления пленок при изменении относительной влажности влияет как их кристаллическая структура, так и концентрация кислородных вакансий. Установлено, что наиболее быстрым временем отклика (~2 с) на изменение относительной влажности характеризуются пленки, в которых преобладает фаза SnO_{2,8} с наибольшей концентрацией кислородных вакансий (~2,3 · 10²⁰ см⁻³).

Ключевые слова: оксиды олова; чувствительность к влажности; кислородные вакансии; кристаллическая структура.