

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

СПЕКТРОСКОПИЯ И ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА В БГУ

**КАФЕДРЕ
ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ
И СПЕКТРОСКОПИИ**

70 ЛЕТ

**МИНСК
БГУ
2024**

УДК 535.33:378.4(476-25).096(091)

ББК 22.344р31(4Бел)БГУ

В75

*Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
Белорусского государственного университета*

Р е ц е н з е н т ы:

член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
доктор физико-математических наук, профессор *А. М. Маляревич*;
доктор физико-математических наук, профессор *М. П. Самцов*

Воропай, Е. С.

В75 Спектроскопия и лазерная физика в БГУ : кафедре лазерной физики и спектроскопии 70 лет / Е. С. Воропай, А. Л. Толстик. — Минск : БГУ, 2024. — 183 с. : ил.

ISBN 978-985-881-667-4.

Рассмотрены основные вехи становления и развития научных направлений на кафедре лазерной физики и спектроскопии, история которой насчитывает 70 лет. Представлена информация о достижениях кафедры в XXI в., основное внимание уделено работам последнего десятилетия. Приведены характеристика основных направлений подготовки специалистов и читаемых спецкурсов, а также описание оригинальных лабораторных практикумов и оборудования, используемого в научной работе и учебном процессе.

Издание адресуется научным и научно-техническим работникам, преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам, специализирующимся в области лазерной физики, спектроскопии и оптического приборостроения, а также всем, кто интересуется историей развития науки.

УДК 535.33:378.4(476-25).096(091)

ББК 22.344р31(4Бел)БГУ

ISBN 978-985-881-667-4

© Воропай Е. С.,
Толстик А. Л., 2024
© БГУ, 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2023 г. кафедра лазерной физики и спектроскопии отметила 70-летие. За это время было подготовлено более 1000 специалистов, которые работали и работают на факультетах физического профиля ведущих университетов, в научно-исследовательских институтах физического и медицинского профилей, на высокотехнологичных предприятиях, выпускающих современное лазерно-оптическое и спектроскопическое оборудование, оптические и голографические элементы. Среди выпускников кафедры — выдающиеся ученые, академики, доктора и кандидаты наук, директора институтов, руководители промышленных предприятий наукоемких отраслей, профессора, доценты, заслуженные деятели науки и образования, учителя. Многие из них удостоены правительственных наград и государственных премий.

Кафедра осуществляет подготовку специалистов, проводит научные исследования и прикладные разработки в современных и востребованных направлениях физики: лазерная физика, нелинейная оптика, лазерная спектроскопия, когерентная оптика и голография, нанофотоника, применение лазеров и спектроскопических методов в научных исследованиях, промышленности и медицине. Созданные преподавателями совместно со студентами, магистрантами и аспирантами приборы используются в научных исследованиях и учебном процессе в белорусских и зарубежных университетах, применяются для защиты от подделки ценных бумаг и документов, в аналитической и биомедицинской практике.

Возникновение кафедры было связано с переездом в Минск из Ленинграда (Государственный оптический институт) плеяды ведущих оптиков-спектроскопистов (А. Н. Севченко, Б. И. Степанов, М. А. Ельяшевич), которые фактически создали новое для республики направление в области атомной и молекулярной спектроскопии и люминесценции.

В 1953 г. возникли две оптические кафедры: спектрального анализа (сейчас кафедра лазерной физики и спектроскопии) (заведующий Б. И. Степанов) и физической оптики (заведующий А. Н. Севченко). Начало подготовки специалистов обеспечило развитие спектральных, а впоследствии лазерно-оптических исследований в нашей республике. В 1955 г. был создан Институт физики и математики Академии наук БССР (первый директор А. Н. Севченко, с 1957 г. — Б. И. Степанов), в 1959 г. реорганизованный в Институт физики АН БССР (далее — Институт физики).

С первых лет существования кафедры научные исследования спектрального анализа проводились в тесном сотрудничестве с Институтом физики и были нацелены как на развитие фундаментальных основ спектроскопии, а позднее и лазерной физики, так и на их практическое применение. Приоритетные результаты были получены в области спектроскопии ураниловых соединений, межмолекулярных взаимодействий в растворах, оптики и спектроскопии жидких кристаллов, спектроскопии биологически значимых молекул. С появлением первых лазеров на кафедре начали развиваться исследования в области лазерной физики, нелинейной оптики и лазерной спектроскопии. Были получены новые результаты по записи динамических голограмм и преобразованию световых полей при многоволновых взаимодействиях, формированию заданных фазовых и поляризационных структур световых полей на основе жидкокристаллических элементов.

Тесная связь кафедры с Институтом физики обусловлена тем, что первым ее заведующим был академик Б. И. Степанов, который начиная с 1957 г. на протяжении 28 лет одновременно занимал должность и директора Института физики. Более половины сотрудников института являются выпускниками кафедры. В настоящее время в институте создан ее филиал. Среди выдающихся сотрудников Института физики, работавших на кафедре, следует отметить академика Н. А. Борисевича — Героя социалистического труда, президента АН БССР (1969 — 1987). Лекции по нелинейной оптике читал академик П. А. Апанасевич, по когерентной оптике и голографии — академик А. С. Рубанов, инициировавший исследования по лазерной физике и нелинейной оптике. Академик В. А. Орлович поставил первые лабораторные работы по нелинейной оптике, руководил написанием дипломных работ, много лет являлся членом совета при Белорусском государственном университете (БГУ) по защите кандидатских и докторских диссертаций. Лекции по оптике читал академик Г. П. Гуринович. Академик Н. С. Казак, буду-

чи директором Института физики (1998 – 2005, 2014 – 2019), инициировал создание филиала кафедры. Академик В. А. Толкачев был председателем Государственной экзаменационной комиссии. Среди выпускников оптических кафедр, оказывавших всестороннюю поддержку, следует назвать сотрудников Института физики академиков В. С. Буракова, А. П. Войтовича, А. М. Гончаренко, А. Н. Рубинова, члена-корреспондента С. А. Тихомирова, члена-корреспондента К. Н. Соловьева. На кафедре лекции по квантовой оптике читал академик С. Я. Килин. Большой интерес у студентов вызывали лекции по нанофотонике академика, сейчас директора Института физики С. В. Гапоненко.

Кафедра участвует в совместных проектах с Белорусским национальным техническим университетом (БНТУ), на протяжении многих лет сотрудничает с кафедрой лазерной техники и технологии приборостроительного факультета, которой заведовали член-корреспондент Н. В. Кулешов и выпускник кафедры член-корреспондент А. М. Малайрович. Александр Михайлович на протяжении ряда лет является председателем Государственной экзаменационной комиссии на физическом факультете БГУ.

Более двух десятков лет кафедра сотрудничает с предприятием «ЛОТИС-ТИИ» (директор — выпускник кафедры В. А. Кононов). На кафедре читал лекции по голографии Л. В. Танин (инициатор создания ЗАО «Голографическая индустрия» и ООО «Магия света»). В последнее десятилетие активизировались работы с предприятием «НТЦ “ЛЭМТ” БелОМО» (директор — академик А. П. Шкадаревич).

В 1971 г. на базе оптических кафедр факультета по инициативе А. Н. Севченко был создан Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем (НИИ ПФП). Кафедра лазерной физики и спектроскопии активно сотрудничает с его подразделениями.

В настоящее время можно выделить следующие области исследований кафедры: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия; динамическая голография и сингулярная оптика; фазово-поляризационные преобразования световых пучков, включая формирование оптических вихрей; фотофизика и нелинейная спектроскопия конденсированных сред; физика жидкокристаллических оптоэлектронных систем; методы и препараты для биомедицинских применений; методы и аппаратно-программные средства спектрально-люминесцентного анализа; разработка лазерных и оптоэлектронных систем в области научно-учебного приборостроения. Созданные сотрудниками кафедры

лазерно-оптические системы широко используются в образовательных целях. Разработаны новые лабораторные практикумы по лазерной физике, нелинейной оптике, волоконной оптике, голографии, оптической обработке информации и нанофотонике. Студенты имеют возможность научиться работать с лазерными импульсами нано-, пико- и фемтосекундной длительности, изучить способы перестройки длины волны лазерной генерации от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра, реализовать оптическое манипулирование микрообъектами с использованием лазерного пинцета и многое другое.

На кафедре постоянно проходят обучение иностранные студенты, магистранты и аспиранты. В 2023 г. здесь обучались 12 магистрантов из Объединенных Арабских Эмиратов (ОАЭ) и 16 — из Китайской Народной Республики (КНР). Постоянно совершенствуются организация и содержание учебного процесса: вводятся новые лекционные курсы и специальные практикумы, обновляется лабораторное оборудование, в значительной мере на основе оригинальных разработок. Высокий уровень подготовки специалистов обеспечивается благодаря активному участию преподавателей кафедры в выполнении проектов по научным и научно-техническим программам, к работе над которыми постоянно привлекаются студенты, магистранты и аспиранты.

В книге представлена информация о достижениях кафедры в XXI в. Основное внимание уделено работам последнего десятилетия.

*И*СТОРИЯ КАФЕДРЫ

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ПЕРИОД

История создания и интенсивного развития оптического и спектроскопического научных направлений в Беларуси начала свой отсчет с 1953 г. В это время на работу в физико-технический институт АН БССР был приглашен А. Н. Севченко, с именем которого связано становление оптики и спектроскопии в Беларуси. По его инициативе и при поддержке государственных органов в БГУ были образованы оптические кафедры: физической оптики (заведующий А. Н. Севченко) и спектрального анализа (заведующий Б. И. Степанов, приглашенный по рекомендации А. Н. Севченко из Государственного оптического института (ГОИ)).

Антон Никифорович Севченко родился 22 февраля 1903 г. в с. Денисовичи Гомельской области в многодетной крестьянской семье. В 1916 г. окончил Денисовичскую начальную школу, с 1922 по 1926 г. учился в Рогачевском педагогическом техникуме. Три года работал сначала заведующим Жеребцовской начальной школы Турковского сельского совета Бобруйского района, затем директором Жиличской неполной средней школы Бобруйского района. В 1929 г. поступил в БГУ на физико-техническое отделение педагогического факультета.

В 1931 г. А. Н. Севченко, после успешной сдачи вступительных экзаменов, был зачислен в аспирантуру Физического института Академии наук (ФИАН) СССР. В 1932 г. началась его научная работа под руководством академика С. И. Вавилова сначала в ФИАНе, а после переезда этого института из Ленинграда в Москву — в аспирантуре ГОИ.

В 1937 г. А. Н. Севченко успешно защитил кандидатскую диссертацию, посвященную изу-



А. Н. Севченко

чению поляризованной люминесценции растворов органических красителей. Наряду с научными исследованиями проводил большую воспитательную и педагогическую работу, читал курсы баллистики и общей физики в Военно-политической академии им. В. И. Ленина (Ленинград) и курс высшей математики в ГОИ, являлся научным редактором всесоюзного журнала «Оптико-механическая промышленность».

Во время Великой Отечественной войны А. Н. Севченко со собственными ему энергией и настойчивостью занимался оборонной тематикой. Он выполнил большую работу по обоснованию единой светомаскировки военных и гражданских объектов, а также по совершенствованию способов люминесцентного освещения шкал военных оптических приборов.

В 1946 г. Антон Никифорович был зачислен в докторантуру Академии наук СССР при Физическом институте им. П. Н. Лебедева (Москва), где занимался исследованием люминесценции ураниловых соединений. Важность выбранных объектов для опытов определялась интересом к открытой к тому времени цепной реакции деления ядер. Итогом исследований явилась успешно защищенная в 1952 г. докторская диссертация.

В 1953 г. А. Н. Севченко избирается академиком АН БССР и переезжает на постоянную работу в Минск. Этот год стал переломным в развитии физических, физико-технических и математических исследований в нашей республике. За короткое время ученый организовал Институт физики и математики АН БССР и был его первым директором. Кроме того, А. Н. Севченко исполнял обязанности академика-секретаря Отделения физико-технических наук АН БССР (1955 — 1956), был членом президиума АН БССР (1956 — 1972) и возглавлял кафедру физической оптики БГУ (до 1978 г.).

В 1957 г. А. Н. Севченко назначен ректором Белорусского государственного университета им. В. И. Ленина. При нем БГУ стал в ряд крупнейших университетов страны, ведущим вузом республики. Признанием личных заслуг А. Н. Севченко, всего профессорско-преподавательского состава и студентов университета следует считать включение БГУ в число 25 ведущих вузов страны и награждение его в 1967 г. орденом Трудового Красного Знамени. В БГУ А. Н. Севченко организовал работу по многим перспективным научным направлениям, руководил исследованиями по люминесценции ураниловых соединений, спектроскопии, люминесценции и генерации сложных

органических молекул, оптике и спектроскопии полупроводников, инфракрасной (ИК)-спектроскопии перекисных и других соединений.

В последние годы жизни А. Н. Севченко вложил много сил и энергии в организацию при БГУ НИИ ПФП — первого в высшей школе республики (1971). В новом институте была создана лаборатория спектроскопии, которой А. Н. Севченко заведовал по 1978 г. Работая директором Института физики и математики, затем ректором БГУ и директором НИИ ПФП, Антон Никифорович создал крупные научные школы по спектроскопии, люминесценции и лазерной физике, по физике твердого тела и полупроводников, по радиофизике, информатике и научному приборостроению, которые широко известны как в нашей стране, так и за рубежом. При его руководстве защищено 10 докторских и свыше 40 кандидатских диссертаций. Среди его учеников — академики и члены-корреспонденты Национальной академии наук (НАН) Беларуси, лауреаты государственных премий и премий Совета Министров Республики Беларусь, заслуженные деятели науки и техники республики.



А. Н. Севченко в ректорате со своими учениками

Научную, научно-организационную и педагогическую работу А. Н. Севченко совмещал с активной общественной деятельностью. Он был депутатом Верховного Совета СССР, в качестве делегата от БССР принимал участие в работе международных организаций ООН (в 1955 г. — член делегации БССР на 1-й конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях (Женева)). В 1956 г. возглавлял Белорусскую правительственную комиссию по выработке



Торжественное заседание, посвященное 120-летию
со дня рождения А. Н. Севченко (2023)

и подписанию Устава по мирному использованию атомной энергии (Нью-Йорк), в 1957 – 1959 гг. — делегацию БССР на международных конференциях по использованию атомной энергии в мирных целях.

Многолетняя и плодотворная работа А. Н. Севченко в области науки и высшего образования была по достоинству оценена советским правительством. В 1971 г. за заслуги в развитии физической науки ему присвоено высокое звание Героя Социалистического труда. Он награжден двумя орденами Ленина, орденом «Знак Почета», медалями. А. Н. Севченко — заслуженный деятель науки БССР, его имя присвоено НИИ ПФП БГУ.

Первым заведующим кафедрой спектрального анализа был **Борис Иванович Степанов**.

Родился 28 апреля 1913 г. в Санкт-Петербурге в семье рабочего-железнодорожника. В 1930 г. поступил на физический факультет Ленинградского государственного университета. После окончания университета в 1936 г. был принят в аспирантуру ГОИ. С этим институтом связан весь ленинградский период научной деятельности Б. И. Степанова. Отметим, что работать в институте он начал в 1934 г., еще будучи студентом. В 1939 г. успешно закончил аспирантуру, защитив кандидатскую диссертацию. Война прервала работу старшего научного сотрудника Б. И. Степанова. Но уже в январе 1943 г. как высококвалифицированный научный работник он был отозван из армии и направлен в ГОИ для выполнения военных заказов.



Б. И. Степанов

После окончания войны Б. И. Степанов возобновляет научные исследования и в 1948 г. успешно защищает докторскую диссертацию. В 1950 г. назначается ученым секретарем ГОИ, затем начальником лаборатории и заместителем начальника одного из отделов.

Научная деятельность Бориса Ивановича многогранна. Его интересы охватывали широкий круг принципиальных вопросов теоретической спектроскопии, физической оптики, люминесценции, молекулярной спектроскопии. Б. И. Степанов был пионером в области теоретической спектроскопии и люминесценции, много внимания уделял разработке теории колебаний многоатомных молекул, отраженной в монографии «Колебания молекул», удостоенной в 1950 г. Государственной премии СССР. Он развил метод расчета мощности

люминесценции, в 1956 г. предсказал явление отрицательной люминесценции, которая проявляется себя как спектральный провал на фоне широкополосного равновесного теплового излучения. Учет фона теплового излучения лег в основу спектроскопии отрицательных потоков. С именем Бориса Ивановича связано развитие и широкое внедрение в спектроскопию вероятного метода расчета распределения населенностей энергетических состояний и последовательного учета вынужденного излучения для описания оптических свойств квантовых систем. Ученый показал, что спектры поглощения и люминесценции сложных молекул связаны между собой соотношением, не зависящим от индивидуальных свойств молекул (универсальное соотношение Степанова).

Белорусский период научной деятельности Б. И. Степанова — это прежде всего работы в области лазерной физики. Борис Иванович — по праву «отец» белорусской лазерной школы. В 1964 г., практически сразу после создания первого лазера, предложил простые вероятностные методы расчета энергетических и временных характеристик оптических квантовых генераторов (лазеров). Результаты были обобщены в монографии «Методы расчета оптических квантовых генераторов», удостоенной в 1976 г. Государственной премии БССР. Широкое признание получили работы Степанова и его сотрудников, связанные с открытием нового класса лазерных сред — органических красителей. Первые лазеры на красителях были созданы в Институте физики АН БССР (1966 г., одновременно с учеными из США и ФРГ). В 1972 г. работа отмечена Государственной премией СССР. В исследованиях Степанова и его учеников заложены основы динамической голографии, открыто новое явление — обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. Это направление возникло на стыке классической голографии и нелинейной оптики и в 1982 г. было отмечено Государственной премией СССР.

Кафедра спектрального анализа в 1953/1954 учебном году — это всего три преподавателя и один лаборант: заведующий кафедрой Б. И. Степанов, старший преподаватель Г. И. Овечкин, старший преподаватель С. Е. Романов и старший лаборант И. В. Головатый.

Между А. Н. Севченко и Б. И. Степановым сложилось некоторое неформальное разделение обязанностей: А. Н. Севченко как физик-экспериментатор основное внимание уделял созданию материально-тех-

нической базы кафедр; Б. И. Степанов лучше знал организационную работу вузовской кафедры, так как читал лекции в Ленинградском университете и в Ленинградском институте точной механики и оптики. Рутинная работа — обычные для любой кафедры задачи: составление учебных программ, утверждение тем дипломных и курсовых, работа спецлабораторий — делалась в первый раз и требовала новых решений. Чтение основных кафедральных курсов — «Спектроскопия» и «Высшая оптика» — также осуществлялось Б. И. Степановым.

В 1957 г. Б. И. Степанов стал директором Института физики. Не взирая на занятость, он продолжал уделять пристальное внимание развитию оптических кафедр: чтение спецкурсов, подготовка аспирантов. Желая освободить себя от организационно-хозяйственной работы, Б. И. Степанов в 1963 г. отказался от обязанностей заведующего кафедрой, оставаясь работать в должности профессора.



Сотрудники кафедры спектрального анализа (1957)

Начиная с 1961 г. Б. И. Степанов полностью сосредоточился на изучении проблем квантовой электроники и лазерной спектроскопии. Им и его учениками в Институте физики АН БССР получены значительные научные результаты, высоко оцененные научной общественностью. В 1967 г. Президиум АН СССР присудил Б. И. Степанову золотую медаль имени С. И. Вавилова за совокупность работ по теории

люминесценции сложных молекул, правительство БССР — почетное звание «Заслуженный деятель науки БССР». В 1972 г. ученый получил Государственную премию СССР за цикл работ по исследованию явления оптической генерации в растворах сложных органических соединений и созданию на их основе нового типа лазеров с плавно перестраиваемой частотой излучения в широкой области спектра. В 1976 г. за цикл работ по разработке методов расчета энергетических и временных характеристик твердотельных оптических квантовых генераторов Б. И. Степанову и его ученикам (В. П. Грибковский, А. М. Самсон, А. С. Рубанов) присуждена Государственная премия БССР. В 1982 г. Б. И. Степанов совместно с П. А. Апанасевичем, Е. В. Ивакиным и А. С. Рубановым получил Государственную премию СССР за цикл работ «Физические основы динамической голографии и новые методы преобразования пространственной структуры световых пучков». В 1973 г. Президиум Верховного Совета СССР присвоил ученому звание Героя Социалистического Труда.



На 100-летию со дня рождения Б. И. Степанова

Завершается первый десятилетний период работы кафедры спектрального анализа под руководством Б. И. Степанова. Штат кафедры на конец этого периода был следующим: профессор Б. И. Степанов, профессор М. А. Ельяшевич, доцент Г. И. Овечкин, старший преподаватель Л. П. Казаченко, ассистент Г. А. Залеская.

ПЕРИОД СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КАФЕДРЫ

Общность целей и задач, состояние материальной базы университета, кадровый состав преподавателей-физиков, да и научная связь между А. Н. Севченко и Б. И. Степановым обусловили необходимость тесного сотрудничества кафедр физической оптики и спектрального анализа. Велось общее делопроизводство, были едиными учебные программы спецкурсов, организация общих спецлабораторий, и, соответственно, студенты обучались в одних учебных группах. В то время преподаватель или лаборант не мог с уверенностью сказать, на какой кафедре он работает.

Организация оптических кафедр — это начало реорганизации всей системы подготовки физиков в БГУ. Основной задачей университетской системы обучения считалась подготовка учителей для школ и техникумов. Выпускникам-физикам присваивалась квалификация «преподаватель физики». Позднее оптические кафедры начали готовить специалистов для промышленного производства и научных учреждений республики. Не случайно с 1957 г. отсчитывается история создания Белорусского оптико-механического объединения (БелОМО), которая началась с основания Минского механического завода им. С. И. Вавилова.

Вслед за оптическими кафедрами на физико-математическом, а с 1958 г. уже на отдельном физическом факультете, открываются специализированные кафедры: физики твердого тела (1957), ядерной физики и мирного использования атомной энергии (1961), электронных математических машин (1963), радиофизики и электроники СВЧ (1965), экспериментальной физики и физической электроники (1965), теплофизики (1965), физики полупроводников (1966), атомной и молекулярной физики (1968), биофизики (1973). Весь этот «парад» кафедр, определивших структуру двух факультетов — физического и факультета радиофизики и электроники, начали именно оптические кафедры. На этот процесс организации новой университетской системы обучения оказала положительное влияние Ленинградская высшая школа.

А. Н. Севченко и Б. И. Степанов начали работу по организации кафедр, образно говоря, на пустом месте. Физическое отделение физико-математического факультета в 1952/53 учебном году — всего три кафедры: общей, теоретической и экспериментальной физики; весь штат этих кафедр — 18 преподавателей.

Все кафедры и их учебные лаборатории располагались в физическом корпусе (сейчас это административное здание ректората). Там же находился деканат факультета. В корпусе имелись всего четыре лекционных аудитории. При этом поточные, большая физическая и малая физическая аудитории использовались не только физиками.

Организованные кафедры физической оптики и спектрального анализа в физическом корпусе разместились в правом крыле здания (сейчас там располагаются кабинеты проректоров по учебной работе).

Первое документально оформленное совместное заседание кафедр спектрального анализа и физической оптики состоялось 5 октября 1953 г. За первое полугодие своего существования кафедры провели семь заседаний. Протоколы отражают работу по организации учебного процесса и проблемы, возникавшие при этом.

Большой вклад в работу кафедры спектрального анализа внес **Георгий Васильевич Овечкин**. В 1939 г. он окончил Среднеазиатский государственный университет. Затем наступила война. О том, какой путь прошел Георгий Васильевич в те годы, говорят его награды: Ордена Красной Звезды и Отечественной войны II степени, три медали. С 1950 г. работал в БГУ на физико-математическом факультете. Научные интересы Г. В. Овечкина совпадали с направлением развития кафедры: он занимался изучением оптических свойств плавленого кварца и являлся ведущим специалистом в этих вопросах. Под руководством Б. И. Степанова результаты своей научной работы Г. В. Овечкин представил в диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1957). Г. В. Овечкин — основной исполнитель в организации на кафедре первой спецлаборатории по спектроскопии. Он вел также учебный спецсеминар «Спектральные приборы».

Само название кафедры определяло направленность ее действий в оказании методической и практической помощи промышленным предприятиям. Содействие в организации на предприятиях спектральных лабораторий, необходимые консультации для работников — эти обязанности лежали на Г. В. Овечкине. Отметим, что такую работу Георгий Васильевич проводил еще до организации кафедры. Его подпись стоит в протоколе № 1 совместного заседания кафедр спектрального анализа и физической оптики, который хранится в Национальном архиве Республики Беларусь.

Подготовка своих преподавателей — основной путь обеспечения работы кафедры. Уже в 1953 г. в аспирантуру при кафедре был зачислен Л. В. Володько, в дальнейшем заведующий данной кафедрой.

В следующие пять лет в аспирантуру поступили выпускники факультета — в будущем работники кафедр: Л. П. Казаченко, А. П. Хапалюк, Д. С. Умрейко, И. П. Зятков, А. В. Чалей.

В 1950 — 60 гг. все ведущие сотрудники Института физики и математики АН БССР, которым в момент организации руководил А. Н. Севченко, а затем Б. И. Степанов, также активно участвовали в работе оптических кафедр БГУ. Здесь особо следует выделить М. А. Ельяшевича.

Михаил Александрович Ельяшевич, ученый с мировым именем, переехал в Минск в 1956 г. по приглашению А. Н. Севченко и Б. И. Степанова. В 1956 — 1957 гг. являлся профессором кафедры спектрального анализа, читал основополагающий курс «Атомная и молекулярная спектроскопия». Позднее М. А. Ельяшевич организовал на физическом факультете третью оптическую кафедру — атомной физики. В 1968 г. он избран ее заведующим, а с 1977 г. был профессором этой кафедры.

Открывается лаборатория спектроскопии — первое научное подразделение, непосредственно связанное с работой кафедр. Это позволило создать более благоприятные условия для научного роста преподавателя, защиты кандидатской диссертации. Увеличилось также количество лаборантов — необходимого учебно-вспомогательного состава кафедр.



М. А. Ельяшевич



Сотрудники кафедр спектрального анализа и физической оптики (1969)

В 1961 г. в соответствии с Постановлением Совета Министров БССР от 23 марта 1961 г. в составе физического факультета была организована проблемная лаборатория полупроводниковой техники со штатом 35 научных сотрудников. Штат был разделен на научно-исследовательские группы, курируемые кафедрами факультета, — группа ядерной физики (кафедра ядерной физики), химическая группа (оптические кафедры). Роль проблемной лаборатории в развитии научных исследований на кафедре была высока. Организация в составе физического факультета научных подразделений — заслуга А. Н. Севченко.

Леонид Викентьевич Володько родился 2 января 1928 г. в д. Боровое Минской области в крестьянской семье. После окончания школы рабочей молодежи в 1948 г. поступил в БГУ. С отличием окончил университет и поступил в аспирантуру, проводил практические и лабораторные занятия со студентами старших курсов. После окончания аспирантуры в 1956 г. работал в должности ассистента, доцента, а позднее — профессора на кафедре спектрального анализа. В 1958 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1966 г. — докторскую, посвященную процессам комплексообразования в растворах органических соединений уранила. По результатам научных исследований соединений уранила под руководством Л. В. Володько защищено восемь кандидатских диссертаций. Вместе с ним начинал работу Д. С. Умрейко, в дальнейшем заместитель директора НИИ ПФП.



Л. В. Володько

Широко известны работы Л. В. Володько и в других областях физической оптики. Он является инициатором внедрения в экспериментальную практику статистического метода исследования кинетики люминесценции, основанном на корреляционном многоканальном анализе временных интервалов между отдельными событиями и их статистических распределений. Применение этого метода расширило информативность экспериментов со сверхслабыми световыми потоками, начало которым положил С. И. Вавилов, он был реализован при построении комплекса аппаратуры многоканального временного анализа.

Большое внимание Л. В. Володько уделял изучению жидкокристаллических (ЖК) веществ. Для установления связи между темпе-

ратурным интервалом существования ЖК-мезофазы и строением молекул этих веществ использовалась спектральная зависимость рассеяния света при фазовых переходах ЖК.

В диапазон научных интересов Л. В. Володько также входили многие вопросы химии, медицины, радиопизики. Выполненный им цикл работ по изучению процессов конденсации фенол-формальдегидных смесей позволил установить механизм образования полимеров, возникновения у них полупроводниковых свойств. Полимеры на основе двухатомных фенолов было предложено использовать в качестве термозащитных материалов в различных областях техники. Под руководством Л. В. Володько сотрудники белорусского научно-исследовательского института неврологии, нейрохирургии и физиотерапии проводили работы по изучению новых лекарственных препаратов для лечения острого кислородного голодания головного мозга и других тканей организма. Рабочим веществом этих препаратов являются бензохиноны. Изучение физико-химических характеристик многих производных бензохинона позволило сделать вывод о возможности хинонов играть роль своеобразных шунтов в дыхательной цепи клеток при недостатке кислорода.

Научной общественности хорошо известны работы Л. В. Володько по выявлению оптимальных условий прохождения радиоволн через каркасные периодические структуры. Исследования позволили создать ряд новых узконаправленных антенн, успешно применяемых на искусственных спутниках земли.

Л. В. Володько как заведующий кафедрой всесторонне поддерживал развитие лазерного направления. Он — известный оптик-спектроскопист, будущий академик. На кафедре была отработана система подготовки оптиков-спектроскопистов. Под руководством Л. В. Володько разработан интерферометрический метод измерения расширения рабочей среды в процессе генерации. По заказу одного из оборонных НИИ на кафедре была создана установка для подобных измерений.

Включение в рабочую программу кафедры курсов по физике лазеров способствовало повышению ее авторитета. В целях оптимального управления процессом обучения на физическом факультете использовали плановое распределение студентов 3-го курса по специализирующим кафедрам. С введением лазерной специализации количество студентов, желающих записаться на кафедру спектрального анализа, всегда превышало план.

Вскоре кафедра поменяла свое название на кафедру спектроскопии и квантовой электроники. Такое решение Ученый Совет физического факультета по предложению Л. В. Володько принял в 1963 г. После введения в перечень научных специальностей физики лазеров в 1991 г. кафедра стала называться кафедрой лазерной физики и спектроскопии.

В октябре 1967 г. Л. В. Володько был назначен на должность проректора по научной работе БГУ. Указанные выше направления исследований нашли продолжение в плане научно-исследовательской работы (НИР) НИИ ПФП, и Л. В. Володько параллельно назначают заведующим отдела электромагнитных явлений данного НИИ. Это способствовало сотрудничеству кафедры и института, выполнению общих тем исследований.

В сентябре 1978 г. научный мир республики потрясло трагическое событие — смерть А. Н. Севченко и последовавшая через три дня смерть Л. В. Володько. Оптические кафедры остались без заведующих. Решение возникших проблем при проведении учебного процесса стало своеобразным экзаменом для их сотрудников.



М. Р. Последович

Руководство кафедрой спектрального анализа временно было возложено на **Михаила Романовича Последовича**. Родился 10 февраля 1940 г. в д. Караваево Минской области. В 1959 г. поступил в БГУ. Вся трудовая деятельность Михаила Романовича связана с университетом: с 1966 г. он работал научным сотрудником спектроскопической группы проблемной лаборатории, преподавал на кафедре спектроскопии и квантовой электроники. Кандидатскую диссертацию по поляризованной люминесценции и дихроизму кристаллов уранилов, выполненную под руководством Л. В. Володько, защитил в 1971 г. Кафедрой М. Р. Последович руководил в течении

года, далее ее возглавил заслуженный деятель науки Республики Беларусь профессор А. И. Комяк.

Анатолий Иванович Комяк родился 20 ноября 1932 г. в д. Первомайск Минской области. После окончания физико-математического факультета БГУ в 1956 г. работал сначала учителем физики средней школы Краснослободского района, затем в Институте физики и математики АН БССР. Научную и педагогическую деятельность в БГУ начал в 1962 г. на кафедре спектрального анализа в должности инженера,

ассистента, а затем доцента (1968). С 1970 г. по 1973 г. заведовал кафедрой общей физики нефизических факультетов, в 1973 — 1978 гг. — кафедрой биофизики физического факультета. В 1974 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, в 1978 г. ему присвоено звание профессора. С 1978 до 1997 г. возглавлял кафедру спектроскопии и квантовой электроники.

А. И. Комяк — известный специалист в области атомной и молекулярной спектроскопии, в частности спектроскопии сложных молекулярных систем и комплексов в конденсированной фазе. Изучению спектрально-люминесцентных характеристик и природе центров свечения в кристаллах ураниловых соединений была посвящена его кандидатская диссертация (1967).

Основополагающими в сфере научных интересов А. И. Комяка стали исследования в области спектроскопии уранилов, инициированные академиком А. Н. Севченко. Используя спектральные и люминесцентные методы, в том числе поляризованной люминесценции, А. И. Комяк проводил изыскания в области колебательных и электронных состояний в кристаллах ураниловых соединений. Было установлено, что за излучение и поглощение ураниловых соединений в видимой области спектра отвечают слабо запрещенные электрические дипольные переходы, что объяснило ранее сложившееся представление о противоречии между электродипольной природой «флуоресцентной» серии оптических переходов и большим временем жизни возбужденного состояния иона уранила в конденсированных средах. На основе проведенных комплексных спектроскопических исследований влияния нейтральных лигандов на положение полос в спектрах люминесценции, поглощения и возбуждения растворов ураниловых соединений была выявлена ранее неизвестная закономерность в зависимости положения полос спектров от донорной способности нейтральных лигандов. Получены уравнения для определения частоты чисто электронных переходов в комплексах уранила от значения суммарного донорного числа экваториального окружения иона уранила. Впервые установлены корреляции между значениями частот чисто электронных переходов и суммарных донорных чисел экваториального окружения для различных координационных чисел по лиганду.



А. И. Комяк

Полученные результаты позволили сформировать единую точку зрения на природу «мультиплетной» структуры низкотемпературных спектров люминесценции и поглощения ураниловых соединений.

Наряду с изучением кристаллических соединений уранила ученый значительное внимание уделял также разработке методов и аппаратуры для обеспечения спектральных исследований процессов образования комплексов уранила в водных и органических растворах.

Большой интерес А. И. Комяк проявлял и к проблемам влияния межмолекулярных взаимодействий на спектроскопические характеристики растворов сложных органических соединений, в частности к исследованиям спектральных, кинетических и поляризационных эффектов, обусловленных неоднородным уширением уровней, явлениям в молекулярных системах с переносом энергии электронного возбуждения.

А. И. Комяк опубликовал более 300 научных работ, среди которых монография по спектроскопии ураниловых соединений, широко известная специалистам, работающим в этой области, 3 учебных пособия по молекулярной спектроскопии и люминесценции, около десятка учебно-методических разработок по спецкурсам для студентов физического факультета. Среди его учеников — 15 кандидатов и 3 доктора наук.



А. И. Комяк с лауреатами премии им. А. Н. Севченко

На протяжении многих лет А. И. Комяк участвовал в работе советов по защите диссертаций, выступал экспертом и оппонентом по диссертационным работам, рецензентом статей в профильных научных журналах. За успешную научно-производственную и педагогическую работу неоднократно был награжден почетными грамотами БГУ, Министерства высшего и среднего специального образования (Минвуза) БССР и СССР. За подготовку кадров высшей квалификации в 1996 г. ему было присвоено почетное звание Заслуженного деятеля науки Республики Беларусь. В 2012 г. Совет БГУ присвоил ученому почетное звание «Заслуженный работник Белорусского государственного университета».

После ухода на пенсию А. И. Комяк по-прежнему принимает активное участие в жизни кафедры, выступает на научных семинарах, обсуждает диссертационные работы соискателей. В 2022 г. при совместном участии доцента кафедры Л. С. Ляшенко издано пособие по решению задач по молекулярной спектроскопии. Своей активностью А. И. Комяк подает пример преподавателям и сотрудникам кафедры и факультета.

Евгений Семенович Воропай в 1961 г. поступил на физический факультет БГУ, а в 1963 был зачислен на образованное отделение радиофизики. Специализировался по оптическим квантовым генераторам на кафедре спектроскопии и квантовой электроники, изучая одновременно и курс радиофизического профиля. Окончил БГУ в 1966 г. с квалификацией «радиофизик со специализацией радиофизик и электроник». Был распределен в аспирантуру Института физики АН БССР, в 1967 г. переведен в БГУ на кафедру общей физики, где работал до 1978 г. в должностях старшего инженера, старшего преподавателя, доцента. В 1978 г. перешел в НИИ ПФП, где работал заведующим лабораторией спектроскопии до 1997 г. С 1997 по 2018 г. заведовал кафедрой лазерной физики и спектроскопии, с 2018 г. является профессором кафедры.

В 1973 г. Е. С. Воропай защитил кандидатскую диссертацию по теме «Поляризованная флуоресценция растворов сложных молекул при двухфотонном возбуждении», а докторскую на тему «Нелинейная люминесценция и методы ее фотометрии» — в 1992 г. В 1993 г. решением высшей аттестационной комиссии (ВАК)



Е. С. Воропай

СССР присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. В 1994 г. Е. С. Воропай присвоено звание профессора по специальности «оптика». В диссертациях ученый изучил основные характеристики нелинейной люминесценции, разработал основные положения поляризованной двухфотонно-возбуждаемой флуоресценции; в работах получили развитие основные положения люминесценции растворов при световом тушении, впервые экспериментально было подтверждено явление вынужденной молекулярной релаксации, разработан ряд методов и аппаратных средств для изучения нелинейно-оптических характеристик сложных молекул в растворах, которые обобщены в монографии «Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения».

В последние годы Е. С. Воропай развивает научное направление в области оптики, лазерной физики и спектроскопии, ориентированное на исследование взаимосвязи спектрально-люминесцентных характеристик со структурными особенностями сложных молекулярных систем и разработку на этой основе молекулярных структур для определенных приложений (лазерной физики, медицины), а также на разработку методов и аппаратуры для изучения молекулярных систем и комплексов. Им создан и запатентован ряд элементов и узлов для аппаратуры аналитического назначения, что использовано при составлении конструкторской документации и создании опытных образцов импульсного спектрофлуориметра для исследования кинетики вторичных свечений в наносекундном диапазоне. Серийный выпуск прибора для ряда учебных заведений и учреждений республики производит УП «Оптрон».

Оценкой высокого уровня научных работ в области спектроскопии и люминесценции сложных молекул явилось присуждение Государственной премии в области науки и техники в 1994 г. за цикл «Флуктуации микроструктуры и фотофизика молекул красителей в растворах» (соавторы Б. А. Бушук, Е. С. Воропай, В. А. Гайсенок, И. М. Гулис, А. Н. Рубинов, В. И. Томин).

Е. С. Воропай сделал ряд докладов на международных конференциях, на некоторых из них входил в состав организационных комитетов. В 2003 г. Е. С. Воропай, А. П. Клищенко, А. А. Минько и В. И. Попчицу за цикл работ «Анизотропия процессов поглощения и испускания сложными органическими соединениями» была присуждена премия им. А. Н. Севченко.

Ученый подготовил 2 докторов и 11 кандидатов наук, опубликовал более 770 работ, в числе которых 4 монографии, 4 препринта и 52 авторских изобретения, включая 4 патента Республики Беларусь и 1 — Франции. Имеет следующие государственные награды: медаль «За трудовое отличие» (1986), лауреат государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники (1994), почетную грамоту Национального собрания Республики Беларусь (2011), заслуженный деятель науки Республики Беларусь (2021), нагрудный знак Министерства образования «Отличник образования» (2014), почетную грамоту Министерства здравоохранения Республики Беларусь (2016); другие награды: почетные грамоты БГУ, Минвуза БССР и СССР, премия им. А. Н. Севченко (2003), почетная грамота НАН Беларуси (2006 и 2009), благодарность председателя Президиума НАН Беларуси (2007), почетную грамоту Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (2008), почетную грамоту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) (2008), почетное звание «Заслуженный работник БГУ» (2012), персональную надбавку Президента Республики Беларусь за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие республики (1999 и 2011), благодарность ректора с вручением ценного подарка (2019). В 2014 г. занесен на Доску Почета БГУ.

Е. С. Воропай был руководителем успешно выполненных проектов по государственной научно-технической программе (ГНТП) «Алмазы», «Приборы для научных исследований», подпрограммы «Научно-учебное оборудование», «Эталоны и научные приборы». В частности, по последней в 2020 г. по заданию «Разработать и изготовить универсальный лазерный комплекс для изучения процессов получения и контроля состава многокомпонентных функциональных материалов методами лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектromетрии» разработан и в настоящее время активно используется в учебно-научной практике лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр (ЛАЭМС). В настоящее время является руководителем ряда заданий и тем, в том числе выполняемых по государственной программе прикладных научных исследований (ГПНИ), ГНТП, со-координатор государственной программы научных исследований (ГКПНИ) «Фотоника». В последние годы основное внимание уделяет разработкам прикладной направленности.

Большое внимание Е. С. Воропай уделяет общественной и организационной работе, он является председателем докторского совета по защита диссертаций при БГУ, членом Совета по защите диссертаций

при БНТУ, заместителем председателя Научного совета, координатором программы ГПНИ «Фотоника», главным редактором «Журнала Белорусского государственного университета. Физика», членом редколлегии «Журнала прикладной спектроскопии», заместителем председателя экспертного совета по лазерно-оптической технике при государственном комитете по науке и технологиям (ГКНТ), членом коллегии национальных экспертов стран СНГ по лазерам и лазерным технологиям от Республики Беларусь по специальности «Лазерное научное приборостроение», членом Совета физического факультета, членом Совета НИИ ПФП, заместителем председателя секции «Оптика и лазерная физика» Государственного экспертного совета № 5 «Фотоника, опто-микроэлектроника, радиоэлектроника и приборостроение», членом научно-технического совета (НТС) подпрограммы «Научно-учебное оборудование» ГНТП «Эталоны и научные приборы», членом экспертного Совета БРФФИ, председателем комиссии по приему вступительных экзаменов в аспирантуру и приему экзамена кандидатского минимума по специальностям «Оптика» и «Лазерная физика», членом бюро Государственного экспертного совета № 5 «Фотоника, опто- и микроэлектроника, радиоэлектроника и приборостроение», членом секции «Оптика и вакуумная технология» экспертного Совета Министерства промышленности Республики Беларусь, председателем Секции физики Научно-методического Совета Министерства образования Республики Беларусь, членом бюро президиума профессорского собрания БГУ.



Сотрудники кафедры лазерной физики и спектроскопии (2010)



На научном семинаре кафедры

Алексей Леонидович Толстик после окончания с золотой медалью средней школы № 23 г. Минска поступил на физический факультет БГУ, который окончил с отличием в 1981 г. С этого времени работал на кафедре спектроскопии и квантовой электроники физического факультета БГУ в должности стажера-исследователя, младшего научного сотрудника, ассистента, доцента, профессора. С 1997 по 2010 г. был заместителем декана по научной работе, с 2010 по 2017 г. — проректором по учебной работе БГУ, с 2018 г. — заведующим кафедрой лазерной физики и спектроскопии. В 1987 г. А. Л. Толстик защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Физическая электроника, в том числе квантовая». В 1992 г. ему присвоено ученое звание доцента кафедры лазерной физики и спектроскопии. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «оптика». В 2007 г. А. Л. Толстику присвоено ученое звание профессора по специальности «физика».



А. Л. Толстик

В сферу научных интересов Алексея Леонидовича входят лазерная физика, динамическая голография и нелинейная оптика, сингулярная оптика и оптическая обработка информации, эффекты самоорганизации в нелинейно-оптических системах, голографические технологии защиты ценных бумаг и документов, лазерно-оптическое и научно-учебное приборостроение. Он создал новое научное направление — «сингулярная динамическая голография», использующая топо-

логический заряд и поляризацию светового пучка в качестве информационных параметров. Разработал теорию многоволновых процессов преобразования световых полей динамическими голограммами, предложил и экспериментально реализовал новые методы некогерентного управления нелинейно-оптическими свойствами многоуровневых резонансных сред, нелинейно-оптические методы управления пространственно-временной и фазовой структурой лазерных пучков, включая некогерентное оптическое усиление динамических голограмм, обращение волнового фронта с одновременным удвоением частоты излучения и др. На основе схем многоволнового смещения впервые реализовано мультиплицирование топологического заряда сингулярного пучка, развиты дифракционные методы измерения нелинейностей пятого и более высоких порядков. Построена теория многоволновых взаимодействий в нелинейных интерферометрах и созданы новые способы реализации оптической мультистабильности, самопульсаций интенсивности и оптического хаоса, предложены новые интерференционно-голографические методы контроля объемных изображений и формирования заданных структур световых полей с возможностью их адаптации к решению разнообразных задач управления лазерным излучением. Разработаны дифракционные и волноводные ЖК-элементы, позволяющие управлять лазерными пучками и их фазово-поляризационными характеристиками.

Под руководством А. Л. Толстика созданы принципиально новые средства контроля голографических элементов и идентификации кодограмм, используемые для защиты от подделки ценных бумаг и документов в интересах Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь. Разработан не имеющий аналога комплекс лазерно-оптического оборудования, используемого в учебном процессе и научных исследованиях университетов нашей республики и зарубежных стран (Россия, Испания, Япония, Китай, Нигерия), включая такие ведущие вузы, как Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Казанский федеральный университет, Томский государственный университет, Кантабрийский университет (Испания) и др. На петербургских технических ярмарках пять разработок ученого отмечены серебряными медалями в номинации «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года».

Большое внимание А. Л. Толстик уделяет учебно-методической работе. Он — автор учебных пособий, в том числе с грифом Министер-

ства образования. Алексей Леонидович составил и внедрил в учебный процесс на физическом факультете новые практикумы по оптической обработке информации, волоконной оптике и нанофотонике, провел модернизацию спецпрактикумов по лазерной физике, когерентной оптике и голографии. А. Л. Толстик разработал и читает курсы лекций «Нелинейная оптика», «Лазерная физика», «Оптическая обработка информации». Под его научным руководством подготовлено и защищено девять кандидатских диссертаций (в том числе аспирантами из Кореи, Иордании, Боливии и Ирака).

А. Л. Толстик возглавляет выполнение заданий по ГПНИ, ГНТП, проекты БРФФИ, осуществляет научные работы по договорам о сотрудничестве с МГУ, Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники, национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург), Йенским университетом (Германия), Кантабрийским университетом, Австралийским национальным университетом. Им опубликовано более 500 научных работ, в том числе 9 монографий и учебных пособий, 150 статей в международных научных журналах (по базам SCOPUS и Web of Science), получено 10 патентов и сделано более 250 докладов на международных конференциях. Он — член программных комитетов более 100 международных конференций, ежегодно выступает с докладами.

А. Л. Толстик является членом совета по защите докторских диссертаций, заместителем председателя научно-технического совета подпрограммы «Научно-учебное оборудование» ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование», членом НТС подпрограммы «Уникальное научное оборудование» и научно-технических советов ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» и «Конвергенция-2025». Он — председатель секции «Фотоника и электроника для инноваций» по ведомственной научно-технической экспертизе Министерства образования Республики Беларусь, член экспертного совета Министерства образования по экспертизе НИР по научному направлению «Лазерные, оптические, опто-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы», главный редактор междисциплинарного журнала «Nonlinear Phenomena in Complex Systems», член редколлегии издания «Журнал Белорусского государственного университета. Физика», член правления научно-технической ассоциации «Оптика и лазеры» и правления Белорусского физического общества. Начиная с 2011 г. четырежды избирался

членом коллегии национальных экспертов стран СНГ по лазерам и лазерным технологиям. С 2019 по 2023 г. — Председатель Государственного экспертного совета № 5 «Фотоника, опто- и микроэлектроника, радиоэлектроника и приборостроение». В 2023 г. включен в состав межведомственной рабочей группы по разработке Комплексного прогноза научно-технического прогресса Республики Беларусь на 2026 — 2030 годы и на период до 2045 года.



Торжественное заседание, посвященное 50-летию кафедры (2003)

А. Л. Толстик награжден медалями Франциска Скорины (2016), С. Э. Фриша (2009) и С. И. Вавилова (2019), почетным дипломом Оптического общества им. Д. С. Рождественского (2000), премией НАН Беларуси за лучшую научную работу 2001 г., премией им. А. Н. Севченко (2012), нагрудным знаком «Отличник образования» (2008), Памятной медалью «300 лет Михаилу Васильевичу Ломоносову» (2014). В 2011 г. удостоен персональной надбавки Президента Республики Беларусь за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие страны, в 2014 г. присвоено почетное звание «Заслуженный работник Белорусского государственного университета». Неоднократно награждался почетными грамотами Министерства образования Республики Беларусь (2001), НАН Беларуси (2011, 2018), Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь (2011, 2018), БРФФИ (2012),

Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (2008, 2018), Благодарностью Председателя Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (2013) и др.

Приведя информацию о заведующих кафедрами, которые безусловно определяли научные направления ее работы и учебный процесс, следует дать сведения о преподавателях, внесших значительный вклад в ее становление и развитие.

Александр Иванович Серафимович после окончания средней школы № 3 столицы поступил в Минский государственный политехнический техникум на специальность «Геодезия», работал геодезистом в институте «Белсельпроект», после службы в армии — в Управлении по делам строительства и архитектуры Мингорисполкома геодезистом. В 1961 г. он поступил на физический факультет БГУ. С сентября 1965 г. работал на кафедре спектроскопии и квантовой электроники в должности старшего инженера, главного инженера, старшего преподавателя, доцента.



А. И. Серафимович

В 1976 — 1980 гг. Александр Иванович работал преподавателем за рубежом. С 1995 г. был заведующим кафедрой естественно-научных дисциплин и деканом подготовительного факультета для иностранных граждан БГУ.

А. И. Серафимович выполнял ряд исследовательских работ в области спектроскопии ураниловых соединений, атомно-эмиссионной и молекулярной спектроскопии, осуществлял разработки прикладного плана по защите ценных бумаг. Совместно с коллективом кафедры разработал и создал принципиально новый научно-обоснованный метод защиты полиграфической продукции от фальсификации, который основан на применении совокупности физико-химических методов и технологических решений, положенных в основу промышленного выпуска защитных волокон с поляризационно-контролируемым чередованием цвета свечения, разработал портативный поляризационный люминесцентный микроскоп, применяемый для идентификации защитной люминесцентной метки. Автор свыше 100 работ и 3 патентов.

В 1970 г. награжден А. И. Серафимович знаком «За заслуги в стандартизации», в 1971 г. за успехи в научно-исследовательской работе —

бронзовой медалью Выставки достижений народного хозяйства (ВДНХ) СССР. За подготовку кадров высшей квалификации в 1986 г. получил знак Минвуза СССР «За отличные успехи в работе», в 2008 г. награжден знаком «Отличник образования» Министерства образования Республики Беларусь. В 2010 г. А. И. Серафимовичу, одному из первых на факультете, присуждено почетное звание «Заслуженный работник Белорусского государственного университета». Разработки ученого отмечены золотой и серебряной медалями на конкурсах инновационных проектов в 2015 и 2016 г.

Несколько поколений выпускников физического факультета, кафедры лазерной физики и спектроскопии, в том числе и работающие на ней сегодня, с благодарностью вспоминают лекции Александра Ивановича.

Альфред Васильевич Чалей в 1953 г. поступил на физикоматематический факультет БГУ, после окончания которого с отличием в 1958 г. был принят в аспирантуру на кафедру спектрального анализа.

Трудовая деятельность Альфреда Васильевича началась в стенах родного университета с должности инженера проблемной лаборатории физического факультета (1962). В 1967 г. под руководством академика Б. И. Степанова защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, посвященную исследованиям температурного режима твердотельных лазеров. Работая на должностях старшего преподавателя, доцента кафедры спектрального анализа (с 1979 г. — доцента кафедры спектроскопии и квантовой электроники), Альфред Васильевич в полной мере раскрыл свой талант педагога. За время работы в БГУ читал курсы лекций студентам физического и химического факультетов по атомной физике, атомной спектроскопии, квантовой радиофизике, физике лазеров.



А. В. Чалей

Будучи прекраснейшим лектором, обладая неугасимой творческой энергией, А. В. Чалей внес значительный вклад в обучение и воспитание многих поколений студентов. Лекции Альфреда Васильевича слушали большинство ведущих специалистов по лазерной физике и нелинейной оптике Беларуси. Понимая, что качественное обучение физике невозможно без современных лабораторных практикумов, А. В. Чалей особое внимание уделял укреплению матери-

альной базы учебного процесса. Под его руководством буквально через несколько лет после создания первого в мире лазера на физическом факультете БГУ был составлен лабораторный спецпрактикум «Оптические квантовые генераторы», а учебная лаборатория по физике лазеров стала одной из первых в СССР. С 1971 г. А. В. Чалей был начальником научно-исследовательского отдела университета, с 1978 по 1979 г. исполнял обязанности проректора по научной работе. При его непосредственном участии в составе научно-исследовательского отдела был организован ряд служб (патентный и информационный сектора, опытно-экспериментальная группа и др.), способствовавших повышению эффективности научно-исследовательских работ и внедрению их результатов в промышленность.

Для научной деятельности Альфреда Васильевича характерны широкий диапазон и тесная связь фундаментальных и прикладных исследований. А. В. Чалей активно работал в области квантовой электроники, физики лазеров, нелинейной и когерентной оптики. На его счету 5 изобретений и более 100 научных работ. Им подготовлено шесть кандидатов наук, один доктор наук. Результаты научных исследований, полученные под руководством Альфреда Васильевича, нашли широкое признание в научном мире. Много сил и времени А. В. Чалей отдавал общественной работе, был ученым секретарем совета по присуждению степени кандидата физико-математических наук при БГУ и членом такого же совета при Институте физики АН БССР. Всю свою жизнь А. В. Чалей посвятил служению образованию и науке. Его отличали высокий профессионализм и всесторонняя эрудиция, неутомимая энергия и незаурядные способности организатора, активная жизненная позиция и богатые душевные качества.

Дмитрий Степанович Умрейко в 1951 г. окончил с золотой медалью среднюю школу № 42 г. Минска, поступил на физико-математический факультет БГУ, после окончания которого был рекомендован в аспирантуру к академику А. Н. Севченко. Работал на кафедре физической оптики, пройдя путь от ассистента до профессора. Совместно с сотрудниками кафедры спектрального анализа он проводил научную работу по молекулярному спектрально-структурному



Д. С. Умрейко

анализу координационных соединений тяжелых металлов (на базе урана). Исследования обобщены в двухтомной монографии и ряде совместных монографий, вышедших в 2000—2006 гг. Им подготовлено 8 докторов и 26 кандидатов наук по физическим, техническим и химическим специальностям.

Д. С. Умрейко внес большой вклад в организацию в университете научных исследований. Возглавлял научно-исследовательский сектор университета (1964—1971), а с момента организации НИИ ПФП был заместителем директора по научной работе (1971—1979). За успехи в научно-исследовательской, научно-организационной и педагогической деятельности в 1971 г. он награжден Почетной Грамотой Верховного Совета БССР, в 1994 г. — Почетной Грамотой Верховного Совета Республики Беларусь, лауреат премии им. А. Н. Севченко (1993). В 1999 г. присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь», в 2010 г. — «Заслуженный работник Белорусского государственного университета».

Александр Сергеевич Рубанов после окончания физико-математического факультета БГУ (1958 г.) работал в Институте физики АН БССР. С 1978 г. был заведующим лабораторией оптической голографии Института физики. В 1965 г. защитил кандидатскую, а 1976 г. — докторскую диссертацию, в 1981 г. был утвержден в ученом звании профессора. В 1989 г. А. С. Рубанов был избран членом-корреспондентом, в 1996 г. — действительным членом Академии наук Республики Беларусь. В 1999 г. ему присвоено звание «Заслуженный деятель науки Республики Беларусь». Лауреат Государственных премий СССР (1982) и БССР (1976).



А. С. Рубанов

Уже в начале своей научной деятельности А. С. Рубанов активно преподавал на кафедре спектроскопии и квантовой электроники. Сама же научная деятельность совпала с появлением первых лазеров. Его кандидатская диссертация под руководством Б. И. Степанова, посвященная исследованиям энергетических характеристик и теплового режима генерации твердотельных лазеров, способствовала развитию лазерного направления на кафедре. При непосредственном участии Александра Сергеевича в 1965 г. был разработан лабораторный спецпрактикум по физике лазеров.

А. С. Рубанов одним из первых в СССР начал исследования термооптики твердотельных лазеров, разработал методы расчета теплового режима и термооптических искажений активных элементов на основе рубина, активированных стекол и граната. За разработку методов расчета энергетических и временных характеристик твердотельных оптических квантовых генераторов А. С. Рубанов в составе авторского коллектива ученых Института физики АН БССР в 1976 г. был удостоен Государственной премии БССР.

В конце 1960-х гг. по инициативе и под руководством А. С. Рубанова в Беларуси были начаты исследования в области голографии. За работы в этом направлении ученому в составе авторского коллектива в 1982 г. присуждена Государственная премия СССР.

В начале 1980-х гг. по инициативе А. С. Рубанова на кафедре была создана научная группа (научно-исследовательская лаборатория (НИЛ) когерентной оптики), занимающаяся экспериментальными и теоретическими исследованиями в области динамической голографии и открытого белорусскими оптиками явления обращения волнового фронта. В 1982 г. А. С. Рубанов создает на кафедре спектроскопии и квантовой электроники учебную лабораторию оптической голографии, в которой студенты могли исследовать когерентные свойства лазерного излучения и основные методы записи голограмм на практике.

А. С. Рубанов выполнил ряд важных прикладных работ: рассчитал ИК-свечение воздуха при вхождении головных частей ракет в плотные слои атмосферы; под его руководством создано технологическое оборудование для производства рельефных голограмм, которое легло в основу реализации в Республике Беларусь системы защиты от подделки ценных бумаг и документов; совместно с сотрудниками БГУ и Института физики разработал ряд электрически управляемых систем типа «рельефная решетка — жидкий кристалл» (включая бистабильные) для управления параметрами световых пучков. Эти работы отмечены Дипломом почета, золотой и серебряной медалями ВДНХ СССР.

А. С. Рубанов активно участвовал в научно-организационной работе. Он являлся заместителем председателя республиканского Совета по координации фундаментальных исследований, заместителем председателя координационного совета по республиканской программе фундаментальных исследований «Радиофизика» и членом координационных советов по республиканским программам «Квант» и «Оптоэлектроника», заместителем председателя Экспертного совета по физике ВАК Республики Беларусь, членом Государственного

экспертного совета по приборостроению, радиоэлектронике и вычислительной технике, Совета по научно-технической политике при Комитете по науке и технологиям, Центрального совета Оптического общества им. Д. С. Рождественского, членом редколлегии «Журнала прикладной спектроскопии», двух специализированных советов по защите докторских диссертаций. С 1996 г. по 2003 г. А. С. Рубанов возглавлял БРФФИ. Среди его учеников 4 доктора и 15 кандидатов наук. Он автор более 300 научных работ, 2 монографий, 35 изобретений и зарубежных патентов (США, Франции, ФРГ и др.).

Кирилл Николаевич Каплевский (доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук, доцент) в 1994 г. поступил на физический факультет БГУ, который закончил с отличием, затем — в аспирантуру. С 2002 г. работал он на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ аспирантом, старшим преподавателем, доцентом.

В 2005 г. Кирилл Николаевич защитил кандидатскую диссертацию «Симметричные индотрикарбоцианиновые красители в растворах и биологических структурах: ионные равновесия, фотоника, фотоцитотоксичность». В круг научных интересов входила фотоника полиметиновых красителей, а также разработка программно-аппаратных модулей управления спектрометрической аппаратурой.

В 2006 — 2007 гг. К. Н. Каплевский являлся руководителем НИР, финансируемой БРФФИ, «Влияние структурных особенностей индотрикарбоцианиновых красителей на фотофизические свойства в растворах», а также исполнителем НИР, финансируемой БРФФИ, «Комплексообразование новых нетоксичных трикарбоцианиновых красителей в растворах и биологических структурах и их фотофизические свойства», участвовал в государственной научно-технической программе «Разработка и внедрение наукоемких систем защиты от подделки бланков ценных бумаг и документов».



К. Н. Каплевский

В 2006 — 2010 гг. К. Н. Каплевский руководил госбюджетной темой Министерства образования «Фотоиндуцированные лазерным излучением процессы в модифицированных полиметиновых красителях, связанных с макромолекулами», выполняемой в рамках ГКПНИ «КМ-структуры». Участвовал в ГКПНИ «Фотоника» («Разработка

фотосенсибилизаторов на основе трикарбоцианиновых красителей, оптимизация их свойств и методик применения для лазерно-оптической диагностики и терапии онкологических заболеваний»), в ГНТП «Эталонны и научные приборы» (задание «Разработать и изготовить гиперспектрометр с оптоэлектронной динамической пространственной фильтрацией и кодированием поля зрения»). С 2011 г. — исполнитель задания «Разработать и изготовить лазерный видео-микроспектрометрический комплекс (ВМСК) для анализа характеристик пространственно сложных объектов» ГНТП «Эталонны и научные приборы».

По результатам исследований Кирилл Николаевич опубликовал более 60 научных работ, в том числе 25 статей в научных журналах. Две его разработки внедрены в учебный процесс. В 2009 г. стал победителем конкурса для назначения стипендии Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым.

Игорь Михайлович Гулис учился на физическом факультете БГУ в аспирантуре по специальности «оптика». С 1977 г. работал на физическом факультете, последовательно занимая должности ассистента, старшего преподавателя, доцента, заведующего НИЛ, профессора кафедры лазерной физики и спектроскопии.

И. М. Гулис является доктором физико-математических наук по специальности «оптика», профессором, лауреатом Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники (цикл работ «Флуктуации микроструктуры и фотофизика растворов сложных органических соединений»).

И. М. Гулис читал спецкурсы по люминесценции, лазерной спектроскопии, прикладной спектроскопии. Является автором научных работ, внедренных в учебный процесс, учебных пособий «Лазерная спектроскопия» и «Люминесценция». Основные направления исследований — динамика фотофизических процессов в растворах и изолированных ван-дер-ваальсовых комплексах сложных молекул, разработка методов и аппаратуры для лазерно-спектроскопических исследований.

И. М. Гулис совместно с коллегами и учениками установил закономерности протекания и спектроскопические проявления ряда важнейших фотофизических процессов (перенос



И. М. Гулис

энергии электронного возбуждения, интеркомбинационные переходы, ориентационная дипольная релаксация, сверхбыстрые стадии фотопереноса протона) в молекулярных системах с неоднородно уширенными спектрами. Они выяснили механизмы влияния межмолекулярных взаимодействий на процессы преобразования электронной и колебательной энергии в возбужденных изолированных сверххолодных ван-дер-ваальсовских комплексах сложных молекул с атомными и молекулярными лигандами. Коллективом авторов разработаны модели молекулярных систем, в которых за счет переноса энергии между компонентами, диполь-дипольного взаимодействия возбужденных центров реализуются сложные (бистабильные, квазиступенчатые) отклики на световое воздействие, а также предложены новые методы получения дискретно и непрерывно перестраиваемых по частоте сверхкоротких импульсов света на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) с нелинейным сложением частот, методы генерации одиночных пикосекундных импульсов в лазерах с распределенной обратной связью (РОС-лазерах) с бинарными активными средами, базирующиеся на использовании процессов энергообмена, обеспечивающих сложный динамический отклик среды.

И. М. Гулис активно участвовал в создании спектральных и лазерно-оптических приборов, которые разрабатывались в рамках ГПНИ и ГНТП. Под его руководством собран комплекс современной лазерно-спектроскопической аппаратуры для исследования фотофизических процессов в молекулярных системах, созданы и внедрены новые средства защиты ценных бумаг; разрабатываются новые спектроскопические приборы для аналитических, научных и учебных применений, приборы для гиперспектрального анализа, ориентированные на биомедицинские применения и использование в системах дистанционного зондирования Земли.

Игорь Михайлович является автором более 180 научных работ. Под его руководством защищены четыре кандидатские диссертации. Находился на научной работе в США, Китае. Являлся членом экспертных советов научных программ, членом и заместителем председателя докторского Совета БГУ по защите докторских диссертаций, членом редколлегии «Журнала прикладной спектроскопии». Награжден почетными грамотами БГУ, Министерства образования Республики Беларусь, нагрудным знаком Министерства образования «Отличник образования», в 2014 г. объявлена Благодарность ректора БГУ.

Анатолий Павлович Зажогин в 1956 г. окончил среднюю школу № 46 г. Минска. В 1961 г. поступил на физико-математический факультет БГУ (вечернее отделение), который окончил в 1967 г. С того же года начал работать на кафедре спектроскопии и квантовой электроники в должности старшего инженера. Научная деятельность связана главным образом с изучением спектроскопических свойств ураниловых соединений и созданием лазеров. В середине 1970 гг. А. П. Зажогин сконструировал азотный лазер с накачкой бегущей волной, в 1974 — 1979 гг. разработал лазер на красителях с ламповой накачкой и длительностью импульса < 100 нс для исследования спектральных свойств ураниловых соединений, причем для этого лазера была создана коаксиальная лампа — кювета и источник накачки соответствующей длительности. Для этих же целей в 1975 — 1976 гг. им был разработан первый в Беларуси струйный квазинепрерывный лазер на красителях. В этом приборе А. П. Зажогин не просто реализовал известные оптические решения, но и создал оригинальную систему формирования ламинарной струи красителя.



А. П. Зажогин

В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование природы центров свечения в кристаллах ураниловых соединений», в которой были выяснены природа дефектов в кристаллах и твердых растворах ураниловых соединений и влияние дефектов на спектральные характеристики данного класса веществ.

В 1981 г. А. П. Зажогин перешел на должность доцента кафедры спектроскопии и квантовой электроники и продолжил научные исследования в области спектроскопии и люминесценции растворов ураниловых соединений. Он определил неизвестные ранее аналитические закономерности между положением полос в электронно-колебательных спектрах люминесценции и электронного поглощения и донорными свойствами лигандов, присоединяемых к иону уранила в экваториальной плоскости. Установленные закономерности позволили создать модельные представления процессов формирования внутренней координационной сферы иона-комплексообразователя. В перспективе эти исследования важны для области аналитической спектроскопии комплексов тяжелых металлов с дотраивающейся электронной оболочкой, что существенно при разработке новых материалов и для расши-

рения их применения. Результатом исследований явилась докторская диссертация «Спектрально-структурные закономерности формирования комплексов уранила в конденсированной фазе», защищенная в 2000 г.

В настоящее время А. П. Зажогин продолжает разрабатывать новые приборы и методы для спектроскопии атомов и молекул. Эти приборы успешно применяются в атомной спектроскопии как в научных исследованиях, так и в учебном процессе кафедры лазерной физики и спектроскопии. Вместе со своими учениками А. П. Зажогин исследует процессы влияния сопутствующих (третьих) элементов на результаты количественного спектрального анализа природных и синтетических объектов при возбуждении спектров излучения атомов электрическими и лазерными импульсами. Активная научно-исследовательская работа в этой области под руководством профессора А. П. Зажогина позволила обнаружить преимущество использования сдвоенных лазерных импульсов, разделенных микросекундными интервалами, по сравнению со стандартными источниками возбуждения спектров для атомно-эмиссионного анализа. Им разработаны и созданы методики мало-деструктивного количественного анализа готовых промышленных изделий сложной формы из специальных латуней, оловянистых и бериллиевых бронз, дюралюминия, углеродистых сталей и чугунов. Исследовано влияние параметров лазерного излучения одиночных и сдвоенных импульсов на деструкцию поверхности образца при анализе. Предложен метод управления толщиной испаряемого слоя путем изменения плотности потока излучения при расфокусировке лазерного луча. Многие результаты были получены им совместно с его учениками при работе на ЛАЭМС производства белорусско-японского предприятия «ЛОТИС ТИИ», что использовалось при разработке коллективом кафедры аналогичного и в чем-то более перспективного прибора в 2020 г.

Достаточно плодотворным было сотрудничество Анатолия Павловича с предприятием «ЛОТИС ТИИ» в 2000 – 2008 гг., где под его руководством были разработаны серийно выпускаемые атомно-эмиссионные лазерные спектрометры и светодиодный ретинальный стимулятор. Благодаря работам А. П. Зажогина сложилось тесное сотрудничество кафедры с крупнейшими предприятиями республики Беларусь: РУП «Белорусский металлургический завод», РУП «Минский тракторный завод», ОАО «Минский автомобильный завод», РУПП «Белорусский автомобильный завод».

А. П. Зажогин опубликовал более 500 научных работ в отечественных и зарубежных журналах, подготовил и издал 12 учебно-методических разработок для студентов. Участвовал в написании четырех совместных монографий, имеет авторские свидетельства на изобретения, руководит написанием дипломных работ, опубликовал курс лекций «Атомный спектральный анализ». Много сил и внимания отдает подготовке аспирантов из Беларуси, Вьетнама, Ирана, Ливана и Китая. А. П. Зажогин разработал и читал студентам и аспирантам специальные курсы по лазерной физике и спектроскопии («Техника лазеров», «Оптоэлектроника», «Полупроводниковые лазеры», «Газовые лазеры» и «Атомный спектральный анализ»). После защиты докторской диссертации он стал заниматься спектроскопической тематикой, в последнее время — лазерным атомно-эмиссионным анализом. Под его руководством защищено пять кандидатских диссертаций, а также дипломные и магистерские работы.

За успешную научно-педагогическую работу А. П. Зажогин неоднократно награждался почетными грамотами факультета и университета, в 2009 г. — Почетной грамотой Министерства образования Республики Беларусь, в 2014 г. — нагрудным знаком «Отличник образования», в 2011 г. получил Благодарность ректора БГУ, в 2013 г. ему присвоено звание «Заслуженный работник Белорусского государственного университета». В настоящее время профессор Анатолий Павлович Зажогин занимается изучением и разработкой наноструктурированных элементов, создаваемых излучением лазерных источников.

Игорь Вячеславович Сташкевич (доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук, доцент) окончил физический факультет БГУ в 1982 г. С 1982 г. работает в БГУ на должности стажера преподавателя, 1983—1989 гг. — научно-го сотрудника, в 1989—1990 гг. — ассистента, с 1990 г. — доцента кафедры лазерной физики и спектроскопии. По результатам исследований в области дифракционной оптики и электрооптики жидких кристаллов (далее — ЖК) в 1989 г. И. В. Сташкевич защитил кандидатскую диссертацию по свойствам электрически управляемых дифракционных систем «рельефная решетка — жидкий кристалл», в 1990 г. получил ученое звание доцента.



И. В. Сташкевич

И. В. Сташкевич разработал и читает общий курс «Физика лазеров» и спецкурсы «Современные лазерные системы. Расчет оптико-лазерных систем», «Волоконная оптика», «Modern laser systems and their applications», «General introduction in Solid State Lighting». Он ведет лабораторные занятия в рамках общего практикума «Физика лазеров» для студентов физического факультета и спецпрактикума «Волоконная оптика» для студентов кафедры, руководит написанием курсовых, магистерских и дипломных работ. Был научным руководителем аспирантки В. В. Зверевой, защитившей диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Являлся научным руководителем ряда НИР, в том числе белорусско-израильского проекта «Аномальные волны в лазерных системах» (2020 – 2023). Автор учебного пособия «Физика лазеров».

Круг научных интересов И. В. Сташкевича: физика лазеров, оптика, электрооптика жидких кристаллов. Автор более 60 научных работ, в том числе 7 изобретений. За многолетнюю научно-педагогическую деятельность неоднократно награждался грамотами физического факультета и университета.

Елена Александровна Мельникова является профессором кафедры лазерной физики и спектроскопии, доктором физико-математических наук, профессором. В 1988 г. окончила физический факультет БГУ (кафедра спектроскопии и квантовой электроники), работала на должности инженера по хозяйственно-договорной тематике, с 1991 г. переведена на должность младшего научного сотрудника НИЛ когерентной оптики при кафедре спектроскопии и квантовой электроники, работала в должности ассистента, старшего преподавателя, доцента.

Круг научных интересов Елены Александровны: электрооптика ЖК, оптическая обработка и передача информации, нелинейная оптика, динамическая и статическая голография. Является автором около 300 научных работ, в том числе 2 патентов Республики Беларусь, а также 80 докладов на международных научных конференциях. По результатам исследований в области электрооптики ЖК и нелинейной оптики в 2001 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Бистабильность и автоколебания в нематических жидкокристаллических системах с оптоэлектронной обратной связью». В 2007 г. ей присвоено ученое звание доцента.

Е. А. Мельникова руководит написанием курсовых, магистерских и дипломных работ. Осуществляла научное руководство аспирантами И. И. Рушновой и О. С. Кабановой (стипендии Президента Респуб-

лики Беларусь на 2016 г.), защитившими в 2018 г. диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. В 2023 г. защитила диссертационную работу «Фазово-поляризационные преобразования световых полей микроструктурированными жидкокристаллическими элементами» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

За время преподавательской деятельности Е. А. Мельникова разработала и читает спецкурсы «Когерентная оптика и голография», «Методы управления световыми потоками», читала общий курс лекций «Основы современного естествознания» для студентов факультета журналистики; проводит лабораторные занятия по общему практикуму «Физика лазеров» для студентов физического факультета и спецпрактикумам «Когерентная оптика и голография» и «Оптическая обработка информации» для студентов кафедры. Является автором двух учебных пособий, одно — с грифом Министерства образования.



Защита докторской диссертации
Е. А. Мельниковой

Елена Александровна являлась руководителем проекта ГНТП «Эталоны и научные приборы», задания ГПНИ «Фотоника» и проекта БРФФИ. Выступала ответственным исполнителем проектов по государственной программе фундаментальных исследований «Когерентность»; ГНТП «Лазерные системы», «Опготех», «Идентификация»; отраслевой научно-технической программе «Учебно-научный комплекс». В ходе выполнения заданий разработаны, изготовлены и введены в учебный процесс: учебно-научный стенд по оптической обработке информации; базовая модель лазера на иттрий-алюминиевом гранате для лабораторного практикума по лазерной физике; практикум по когерентной оптике и голографии; практикум по волоконной оптике. Разработанный и изготовленный аппаратно-программный комплекс для объективной оценки качества тесненных голограмм введен в производство на ЗАО «Голографическая индустрия».

Е. А. Мельникова поддерживает научные связи с Йенским университетом, МГУ им. М. В. Ломоносова, с Центром нелинейной физики Австралийского национального университета. Член Международного оптического общества им. Д. С. Рождественского и Белорусского физического общества.

Людмила Сергеевна Ляшенко в 2002 г. поступила на физический факультет БГУ на специальность «физика (производственная деятельность)». В 2008 г. закончила магистратуру БГУ по специальности «оптика» с присвоением степени магистра физико-математических наук, в 2011 г. — аспирантуру (защитила кандидатскую диссертацию на тему «Фотофизика фотоактивных трикарбоцианиновых красителей»). Присвоена степень кандидата физико-математических наук.



Л. С. Ляшенко

В годы учебы Людмила Сергеевна стажировалась на физическом факультете Вильнюсского университета (Литва) в рамках международной программы ATLAS. Награждена премией НАН Беларуси им. В. Ф. Купревича для студентов (2007), стипендией Президента Республики Беларусь аспирантам (2010).

С 2011 г. Л. С. Ляшенко работала в НИИ ПФП им. А. Н. Севченко, с 2012 г. — преподавателем, а затем старшим преподавателем в Командно-инженерном институте Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. С 2014 г. является доцентом кафедры

общей физики физического факультета БГУ, с 2016 г. — доцентом кафедры лазерной физики и спектроскопии. В 2018 г. была секретарем Совета физического факультета, с 2019 по 2022 г. — заместителем декана по учебно-воспитательной работе на общественных началах.

В 2022 г. Л. С. Ляшенко была назначена директором Совместного института БГУ и Даляньского политехнического университета (Китай), по совместительству являлась доцентом кафедры лазерной физики и спектроскопии.

Л. С. Ляшенко — соавтор учебного пособия по решению задач по молекулярной спектроскопии, автор более 100 научных работ, из них 5 патентов на полезную модель, 2 акта внедрения.

Основные научные интересы Л. С. Ляшенко — спектроскопия молекулярных систем и комплексов, взаимодействие лазерного излучения с биоструктурами, фотоника молекул органических соединений в растворах и биотканях.

В качестве исполнителя Л. С. Ляшенко принимает участие в выполнении исследовательских проектов и ГПНИ. Являлась руководителем НИР «БРФФИ-Минобразование-М» на тему «Оптимизация флуоресцентных методов контроля распределения фотосенсибилизаторов в организме и биологических системах» и исполнителем ГПНИ «Химические технологии и материалы» подпрограмма 5 «Фармакология и фармация» задание 5.14 «Изучение химико-фармацевтических свойств субстанции фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя и ее стабильности; оптимизация условий фотовоздействия на опухолевые ткани в процессе фотодинамической терапии». Результаты ее исследований фотофизических свойств трикарбоцианиновых красителей в растворах и целлюлозе имеют прикладное значение, использованы при разработке и серийном производстве флуоресцентных инфракрасных меток для повышения степени защиты ценных бумаг и документов, что подтверждено актом о практическом использовании результатов исследования в полиграфической промышленности на РУП «Криптотех» Департамента государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь.

Л. С. Ляшенко руководит написанием курсовых, дипломных, магистерских и диссертационных работ.

Дмитрий Владиславович Гурбач (доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук) в 2000 г. с отличием окончил физический факультет БГУ, в 2001 г. — магистратуру БГУ. В 2018 г. защитил кандидатскую диссертацию, получил уче-

ную степень кандидата физико-математических наук по специальности «оптика». Работал в должности ассистента кафедры лазерной физики и спектроскопии, позже в той же должности — на кафедре общей физики, с 2015 по 2019 г. — старший преподаватель кафедры лазерной физики и спектроскопии, с 2019 г. — доцент кафедры.



Д. В. Горбач на занятиях в лаборатории лазерной физики
с магистрантами из КНР

Дмитрий Владиславович читает лекции для студентов по курсам «Лазеры в медицине и лазерные технологии», «Современные лазерные технологии», «Оптика анизотропных сред», «Нанопотоника», «Современные приложения нанопотоники»; спецкурсы для магистрантов «Лазерная обработка материалов», «Спектроскопия и диагностика нано- и микрообъектов»; спецкурсы для иностранных магистрантов на английском языке «Optical and Laser Instrument Engineering»; проводит лабораторные занятия в рамках общих практикумов «Спектроскопия наноструктур» для студентов физического факультета, «Оптика» — химического и физического факультетов; руководит занятиями в лаборатории специализации для студентов «Физика лазеров и нелинейная оптика», «Оптическая обработка информации», «Нанопотоника»; лаборатории специализации для магистрантов «Фотоника нано- и микрообъектов»; лаборатории специализации для иностранных магистрантов на английском языке «Contemporary Laser Systems».

Дмитрий Владиславович участвовал в разработке учебных программ по дисциплинам «Лазеры в медицине и лазерные технологии», «Современные приложения нанофотоники», «Нанофотоника. Волоконная оптика», «Спектроскопия и диагностика нано- и микрообъектов», «Лазерная обработка материалов», лабораторных спецпрактикумов «Фотоника микро- и нанообъектов», «Физика лазеров, нелинейная оптика, когерентная оптика и голография», «Фотоника микро- и нанообъектов», «Спектроскопия и диагностика нано- и микрообъектов», «Лазерная обработка материалов».

Д. В. Горбач руководит написанием курсовых, дипломных и магистерских работ, в том числе иностранными магистрантами. Участвовал в выполнении международного проекта Программы Эразмус + «Совершенствование магистерского образования в области физических наук в белорусских университетах». Успешно занимается научной деятельностью: участвовал в выполнении заданий ГНТП «Эталоны и научные приборы» и ГПНИ «Электроника и фотоника», являлся руководителем международного проекта БРФФИ «Синтез, контроль и лазерная диагностика тонкопленочных термоэлектрических материалов на основе многокомпонентных соединений $PbSnSeTe$ » (2019 – 2020).

При участии Д. В. Горбача подготовлены методические указания к новым лабораторным спецпрактикумам и внедрены в учебный процесс научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами, научно-учебный лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов, модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов и лазерно-оптический бесконтактный метод определения параметров теплопереноса в тонкопленочных полупроводниковых структурах».

Разработки «Научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами» и «Научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных лазеров» Д. В. Горбача отмечены серебряными медалями на петербургских технических ярмарках (2020, 2022). Список публикаций включает более 95 научных работ, из них 28 статей в научных журналах, 3 пособия, 1 патент.

Ксения Федоровна Ермалицкая (доцент, кандидат физико-математических наук) в 2001 г. с золотой медалью окончила лицейский класс средней школы № 95 г. Минска, в 2006 г. — физический факультет БГУ, через год — магистратуру, с 2007 по 2010 г. обучалась в аспирантуре



К. Ф. Ермалицкая

по специальности «лазерная физика». В 2010 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия многокомпонентных сплавов и функциональных покрытий». В 2013 г. К. Ф. Ермалицкой присвоено ученое звание доцента. Является автором более 100 научных работ.

В 2009 г. ей была назначена стипендия Президента Республики Беларусь, а в 2010 г. К. Ф. Ермалицкая стала лауреатом специального фонда Президента Республики Беларусь, в 2011 г. получила премию им. А. Н. Севченко за цикл работ

«Состав, структура и свойства многокомпонентных конструкционных сплавов». Работала на кафедре лазерной физики и спектроскопии лаборантом, инженером, научным сотрудником, с 2011 г. — заведующая НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии кафедры лазерной физики и спектроскопии и кафедры физической оптики физического факультета, с 2018 г. — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии.

Ксения Федоровна преподает на кафедре лазерной физики и спектроскопии с 2010 г., читает лекции по курсам «Спектроскопия наноструктур», «Лазерная обработка материалов (III ступень образования)», «Теория и техника спектроскопии», «Нанофотоника. Методы оптической спектроскопии наноструктур», «Основы спектроскопии и спектрального анализа», «Основы спектроскопии»; ведет занятия по лабораториям специализации: «Экспериментальная спектроскопия», «Спектральный анализ», «Когерентная оптика и голография. Оптическая обработка информации. Лазерная спектроскопия. Волоконная оптика». Принимала участие в работе Совета молодых ученых и учебно-методической комиссии физического факультета БГУ.

С 2020 г. К. Ф. Ермалицкая проводит занятия на английском языке для магистрантов из ОАЭ и КНР, руководит написанием курсовых работ и магистерских диссертаций иностранных магистрантов. Читает курсы «Optoelectronics», «Laser Spectroscopy», «Laser Diagnostics of materials», «Theory and technique of spectroscopy».

Область научных интересов: оптоэлектроника, атомная спектроскопия, лазерная спектроскопия, спектральный анализ, лазерные технологии, атомная спектроскопия. Проводит совместные научные

исследования с Институтом истории НАН Беларуси, Национальным историческим музеем, историческим факультетом БГУ по малодеструктивному элементному анализу артефактов железного века и Средневековья.

Дмитрий Сергеевич Тарасов еще в школе стал интересоваться наукой, принимал участие в школьных олимпиадах по физике, химии и математике, в Турнире юных физиков. В 2005 г. поступил на физический факультет БГУ, в 2007 г. был зачислен на кафедру лазерной физики и спектроскопии, где подключился к научным исследованиям, выполняемым на кафедре и лаборатории спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ под руководством профессоров Е. С. Воропая и М. П. Самцова.

В 2010 г. Дмитрий Сергеевич окончил БГУ, получив специальность «физика (научно-исследовательская деятельность)», был распределен в лабораторию спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко БГУ. В 2010 – 2014 гг. учился в магистратуре и аспирантуре физического факультета. В 2019 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Фотофизические свойства индотрикарбоцианиновых красителей с полиэтиленгликолями для фотодинамической терапии» по специальности «оптика». В 2022 г. присвоено ученое звание доцента.

Основное направление научной деятельности Д. С. Тарасова связано с исследованием фотофизических свойств индотрикарбоцианиновых красителей и разработка на их основе фотосенсибилизаторов для фотодинамической терапии онкологических заболеваний. При его непосредственном участии проводятся исследования в рамках ГПНИ, выполнено несколько проектов БРФФИ. Результаты исследований представлялись на республиканских и международных научных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных журналах. Является автором более 150 научных публикаций. Принимал активное участие в проектах по созданию спектрометрического оборудования, где занимался разработкой программного обеспечения для автоматизированного управления аппаратурой. При его непосредственном участии разработаны и внедрены в учебный практикум лазерный видео-микроспектрометрический комплекс для анализа характеристик пространственно сложных объектов, лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр.



Д. С. Тарасов



В. В. Ковгар

Виктория Викторовна Ковгар после окончания БГУ в 2010 г. обучалась в магистратуре и в аспирантуре Института физики НАН Беларуси. В 2023 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Спектрально-люминесцентные и лазерные свойства иттербий-содержащих иттрий-алюмоборатных и теллуритно-вольфраматных стекол» по специальности «оптика».

В Институте физики НАН Беларуси В. В. Ковгар работала на должностях инженера, младшего научного сотрудника, научного сотрудника, заместителя заведующего лабораторией; с 2018 г. по настоящее время работает научным сотрудником центра «Нелинейная оптика и активированные материалы»; с 2020 г. также работает на кафедре лазерной физики и спектроскопии БГУ.

Виктория Викторовна является автором 80 научных публикаций, в том числе 8 статей в рецензируемых зарубежных научных журналах, а также 10 патентов на изобретения в Республике Беларусь и Российской Федерации. Принимает активное участие в работе республиканских и международных конференций.

Научные успехи В. В. Ковгар отмечены рядом наград: диплом I степени в конкурсе на лучшую первую научную работу среди магистрантов НАН Беларуси (2010), диплом I степени на Республиканском конкурсе научных работ студентов высших учебных заведений Республики Беларусь (2011), третья премия Специального фонда Президента Республики Беларусь по социальной поддержке одаренных учащихся и студентов (2012), стипендия Президента Республики Беларусь аспирантам (2013), стипендия Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым (2018), Почетная грамота Института физики НАН Беларуси (2018), премия им. академика Н. А. Борисевича для молодых ученых Института физики НАН Беларуси (2019).

РАЗВИТИЕ
НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
НА КАФЕДРЕ В XXI в.

АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Кафедра лазерной физики и спектроскопии в начале своего существования называлась кафедрой спектрального анализа, поэтому логично было это направление развивать и в новом тысячелетии.



Заседание Государственной экзаменационной комиссии в ОАЭ (2023)

Первой работой по данной тематике в 2000 г. стала диссертация **Климентия Ивановича Червяковского** «Процессы поступления вещества в плазму дугового разряда при атомно-эмиссионном анализе образцов золота и серебра малой массы» под научным руководством А. П. Зажогина, который после защиты в 2000 г. докторской диссертации по ураниловой тематике переключился на атомно-эмиссионную спектроскопию.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что проблема поступления вещества пробы в плазму разряда — одна из цен-



К. И. Червяковский

тральных в теории атомно-эмиссионного анализа. Количественное определение элементного состава пробы происходит по интенсивности спектральных линий элементов, полученных при регистрации излучения плазмы разряда с использованием эмпирической формулы Ломакина — Шайбе. В то же время в подавляющем большинстве случаев элементный состав плазмы не соответствует элементному составу пробы в результате фракционного испарения примесей и других физико-химических процессов, вызывающих неравномерное поступление элементов в разряд.

Особое значение в процессе выхода элемента в окисную пленку имеет отношение скорости окисления элементов к скорости их диффузии к поверхностному слою, так как известно, что в большинстве случаев диффузионное звено является лимитирующим при окислении сплавов. Исследования показали, что скорости химических взаимодействий в металлургических реакциях при высоких температурах обычно на несколько порядков превышают скорости таких процессов, как диффузия в жидких (и тем более твердых) фазах.

В результате проведенных исследований экспериментально изучено и описано влияние окислительной способности элементов примесей на их поступление в плазму дугового разряда при атомно-эмиссионном анализе образцов золота и серебра малой массы; детально изучен процесс поступления в плазму разряда примесей, прошедших стадию внутреннего окисления при атомно-эмиссионном анализе образцов серебра малой массы; определены физико-химические характеристики элементов-примесей и элемента-основы, определяющие характер и последовательность поступления примесей в плазму дугового разряда; построены теоретические модели поступления примесей в плазму дугового разряда постоянного и переменного тока, учитывающие влияние на данный процесс скорости диффузии, летучести примеси и процесса электрической эрозии.

Разработаны новые методики атомного эмиссионного анализа золота и серебра на спектрометре нового поколения, в котором в качестве приемника излучения применяется фотодиодная линейка, а информация о поступающем на нее излучении обрабатывается персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ). Это

позволило значительно сократить время анализа (в два-три раза) и уменьшить начальную массу пробы драгоценного металла в два — четыре раза по сравнению с рекомендуемыми соответствующими ГОСТами.

Разработанные методики по атомно-эмиссионному методу анализа примесей в серебре, золоте, платине и палладии прошли аттестацию в Белорусском государственном институте метрологии и успешно используются в Государственной лаборатории пробирного анализа УП «Унидрагмет БГУ».

Атомный спектральный анализ, лежащий в основе качественного и количественного спектрального анализа материалов и изделий, имеет древнюю историю. Применение в качестве источников возбуждения лазеров ознаменовало новый этап в развитии методов анализа. Такие источники были использованы в диссертационном исследовании **Ксении Федоровны Ермалицкой** «Двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия многокомпонентных сплавов и функциональных покрытий» (научный руководитель — Е. С. Воропай). Для возбуждения применяли двухимпульсные лазерные источники с регулируемым интервалом между импульсами. Атомно-эмиссионная спектроскопия с лазерными источниками возбуждения, работающими в частотно-импульсном режиме, и в том числе двухимпульсная лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия благодаря отсутствию необходимости предварительной механической и химической подготовки образцов к анализу и малым количествам вещества, требуемым для исследования, становится одним из лидирующих направлений атомно-эмиссионного анализа различных объектов.

В диссертации изучались процессы, происходящие в распространяющейся абляционной плазме, возбуждаемой сдвоенными лазерными импульсами; анализировались возможные механизмы увеличения интенсивности спектральных линий элементов при переходе от одноимпульсной к двухимпульсной абляции. Были определены оптимальные параметры лазерного излучения, позволяющие снизить погрешность анализа до уровня, заложенного в ГОСТе и нормативных документах. Экспериментально изучены особенности взаимодействия излучения сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга во времени, с поверхностью металлов и сплавов; на основании полученных данных сделаны выводы о причинах существенного увеличения интенсивностей атомных линий углерода при переходе

от одноимпульсной к двухимпульсной абляции в атмосфере воздуха. Исследовано влияние параметров лазерного излучения (плотность потока излучения, энергия импульсов и межимпульсный интервал) на количество испаряемого сдвоенными лазерными импульсами вещества. Показано, что при двухимпульсной абляции материал многокомпонентных сплавов поступает в эрозионный факел в результате испарения и выплеска расплава под воздействием давления отдачи паров и излучения второго импульса, при этом расфокусировка лазерного излучения относительно поверхности образца позволяет регулировать толщину, обеспечивая приемлемое соотношение «сигнал — шум». В частности, для использованного спектрометра было достигнуто разрешение на уровне 0,1 мкм и продемонстрировано, что разработанные аналитические методики могут применяться для определения концентрации компонентов в функциональных покрытиях. Разработана методика количественного анализа промышленных многокомпонентных сплавов — сталей, чугунов, бронз и латуней, а также послойного количественного анализа с субмикронным разрешением функциональных Ti-Zr-, латунного и бронзового покрытий методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии.

В последние годы анализ биологических объектов стал одной из основных областей применения инструментальных, в том числе спектральных, методов анализа. Такие исследования актуальны при диагностике врожденных патологий, экологически обусловленных заболеваний, профессиональных заболеваний, связанных со спецификой промышленного производства, и др. Патологическое состояние организма тесно связано с изменениями содержания химических элементов в биологических жидкостях (БЖ). Доказано огромное влияние макроэлементов (кальций, калий, натрий, магний и др.) и микроэлементов (цинк, медь, железо, алюминий и др.) на функционирование организма и состояние здоровья. В связи с этим особое значение приобретает разработка методов ранней диагностики накопления и распределения некоторых химических элементов в БЖ человека. В определенной мере эти проблемы были затронуты и в диссертационных работах, защищенных на кафедре. Одной из первых явилась диссертация **Чинь Нгок Хоанга** «Лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия локального распределения макроэлементов в образцах биологических жидкостей, высохших на твердой поверхности», защищенная в 2013 г. (научный руководитель — профессор А. П. Зажогин).

В медицинской практике для анализа изменений содержания химических элементов в БЖ применялся метод, основанный на визуальном анализе структур, образовавшихся при высыхании капли. Данная диссертация посвящена разработке новых методик количественного определения локального пространственного распределения и общего содержания эссенциальных элементов Са, Mg и Al в высохших каплях БЖ и выявления особенностей агрегирования молекул белков с макроэлементами для нормы и патологии в целях поиска маркеров заболеваний.

Были изучены следующие БЖ — кровь, плазма крови, спинномозговая жидкость, растворы белков. Выбор объектов исследования обусловлен тем, что патологическое состояние организма тесно связано с изменением содержания химических элементов в органах и тканях, приводящим к отклонениям в обменных процессах и нейрофизиологических функциях, нарушениям внутриклеточных и системных механизмов адаптации. Изучались процессы, протекающие на поверхности и в объеме высыхающей капли, а также их влияние на интенсивность спектральных линий при воздействии на образцы вдвоенными лазерными импульсами. Выбор предмета исследования обусловлен рядом преимуществ лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии по сравнению со стандартными методами спектрального анализа.

В результате проведенных исследований доказано, что переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции капель биологических растворов, высушенных на гладкой или пористой поверхности, при неизменной энергии и мощности излучения приводит к многократному (до 10) увеличению интенсивности спектральных линий кальция, магния, алюминия, при этом наличие белков в составе крови, плазмы и других БЖ приводит к повышению концентрации макроэлементов на периферии капли при высыхании. Обнаруженные существенные различия в пространственном распределении концентраций макроэлементов в высушенных каплях БЖ для здоровых людей и лиц с патологическими отклонениями могут послужить основой для разработки новых диагностических методов.

В настоящее время установлено, что большинство патологий, обусловленных такими распространенными заболеваниями как ишемическая болезнь сердца, гипертоническая болезнь, болезни пищеварительных органов, опухоли, заболевания центральной нервной системы, вызваны заметным изменением содержания жизненно необходимых (эссенциальных) элементов в биологических субстратах человека. При патологии возникает значительный дисбаланс в распределении физио-

логически значимых макро- и микроэлементов. В связи с этим особое значение приобретает разработка методов не только синоминутной, но особенно ретроспективной оценки накопления и распределения химических элементов в организме человека, что в значительной степени может помочь диагностике болезней и выработке эффективных мер для их профилактики и лечения. Этой проблеме посвящена диссертация **Марии Петровны Патапович** «Атомно-эмиссионный спектрометрический анализ развития нарушений обмена макро- и микроэлементов в организме человека», защищенная в 2014 г. (научный руководитель — профессор А. П. Зажогин). Целью работы являлась разработка новых методик количественной и полуколичественной оценки общего содержания и локального распределения жизненно необходимых элементов Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Zn и Al в биосубстратах человека с использованием методов атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии. Работа проводилась при консультировании с доктором медицинских наук, профессором, заведующим отделом Республиканского научно-практического центра (РНПЦ) неврологии и нейрохирургии Н. И. Нечипуренко, и доктором медицинских наук, профессором, заместителем директора по научной работе РНПЦ психического здоровья Т. В. Докукиной — ведущими специалистами нашей страны в области заболеваний центральной нервной системы.



Профессор А. П. Зажогин с аспирантами
(слева направо: М. П. Патапович, К. Ф. Ермалицкая, Чинь Нгок Хоанг)

Объектами исследования выбраны волосы и кровь, поскольку они являются наилучшими индикаторами изменений содержания химических элементов в организме, сопровождающих обменные процессы и нейрофизиологические функции человека. Изучались процессы, влияющие на интенсивность спектральных линий элементов и чувствительность анализа при возбуждении спектров образцов электрической дугой переменного тока и сдвоенными лазерными импульсами. Сделаны выводы, что воздействие сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга во времени на 6 – 9 мкс, на высушенную на поверхности пористого тела каплю БЖ обеспечивает практически десятикратное увеличение интенсивности спектральных линий элементов по сравнению с интервалами 0 – 2 мкс и позволяет одновременно определять локальные пикограммовые количества жизненно необходимых элементов (Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Zn и Al) при регистрации спектров в атмосфере воздуха. Разработанные методики полуколичественного и количественного определения общего содержания и локального пространственного распределения жизненно необходимых элементов в образцах цельных волос методом двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии позволяют проводить ретроспективную оценку метаболизма жизненно необходимых элементов в организме человека и могут служить основой для разработки новых диагностических методов.

Последующие диссертации, в исследованиях которых используется воздействие на материалы высокоинтенсивными импульсами лазерного излучения, направлены на разработку технологий создания новых материалов (**Фадаиян Ахмадреза Голамали** «Процессы образования нитрида алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха», год защиты — 2018-й (научный руководитель — профессор А. П. Зажогин)). Исследование посвящено разработке методики создания материалов, перспективных и применяемых в микроэлектронике и оптоэлектронике. Одними из таких являются нитриды металлов, включая нитрид алюминия (AlN) и керамические материалы на его основе. AlN имеет высокую теплопроводность,



Фадаиян Ахмадреза
Голамали

высокое значение электрического сопротивления (до 10^{14} Ом·см) и ширину запрещенной зоны $\approx 6,2$ эВ. Следует отметить, что одна из кристаллических фаз нитрида алюминия (вюрцит) имеет прямозонную характеристику, что позволяет использовать ее для приборов, излучающих в области глубокого ультрафиолета.

Целью данной диссертации было выяснение возможности и определение условий получения AlN методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере для использования их в технологиях получения нанокристаллов и напыления тонких пленок AlN. Экспериментально установлено, что переход от одноимпульсного к двухимпульсному воздействию на мишень из алюминиевых сплавов при неизменной энергии и плотности мощности лазерного излучения приводит к более чем стократному увеличению интенсивности спектральных линий ионов алюминия и азота, полос AlN и AlO. При увеличении плотности мощности оптимальный интервал между импульсами увеличивается от 5 до 10–12 мкс. Выявленная зависимость оптимального временного интервала между импульсами на образование AlN при абляции мишени указывает на особенности взаимодействия излучения второго импульса с продуктами конденсации паров металла, оставшихся от первого импульса, внутри образующегося глубокого канала.

Установлено, что при воздействии одиночных лазерных импульсов на мишень процесс образования AlN в приповерхностной лазерной плазме практически не идет, даже при наличии большого количества атомов алюминия и активированного азота в виде ионов. Показано, что только при лазерном воздействии второго импульса на металлическую мишень поток испарившихся атомов смешивается с активированной воздушной плазмой, получающейся в результате взаимодействия излучения с продуктами абляции, оставшимися от первого импульса. Последующее расширение этой смеси ведет к снижению ее температуры и пересыщению пара.

Определены временные интервалы между импульсами (5–15 мкс), энергией импульсов (40–60 мДж) и параметрами расфокусировки излучения на ± 1 мм, обеспечивающими возможность получения необходимых концентраций одно- и двукратно ионизированных атомов алюминия и ионов азота, способствующих существенному увеличе-

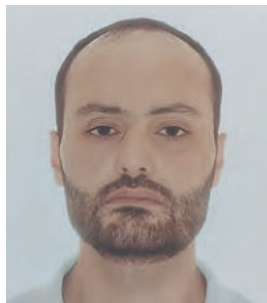
нию поступления нанокластеров AlN и радикалов AlO в лазерную плазму.

На примере синтеза тонкопленочных покрытий из нитрида алюминия и оксидов свинца показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе, снижая до приемлемого уровня негативное воздействие окружающей атмосферы на процессы осаждения (торможение осаждаемых частиц, внедрение атмосферных газов в объем пленки).

Показанные возможности и преимущества использования сдвоенных лазерных импульсов при получении наноконплексов и пленок нитридов алюминия можно использовать и для других нитридов металлов, перспективных для создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов. Разработанные методики повышения выхода нанокластеров AlN при предварительном оксидировании поверхности алюминия можно использовать для получения высокоактивных нанопорошков.

Диссертационная работа **Баззала Ходора** «Процессы образования нанопорошков Al, Al₂O₃, AlN в плазме при воздействии на алюминиевые сплавы сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха», защищенная в 2021 г. (научный руководитель — профессор А. П. Зажогин) направлена на разработку технологий создания нанопорошков. В результате проведенных исследований установлено, что воздействие последовательности серий сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга на 5 — 12 мкс, на поверхность алюминиевой мишени увеличивает в сотни раз количество ионов алюминия и азота в лазерной плазме по сравнению с нулевым интервалом и позволяет создать условия для образования и одновременного спектрального определения нитридов и субоксидов алюминия в атмосфере воздуха.

Установлено, что при малом числе (10 — 15) сдвоенных импульсов в серии преимущественно образуются нанокластеры Al. При увеличении количества последовательных импульсов в серии до 50 — 60 рост количества AlN и AlO происходит за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержа-



Баззала Ходора

щего ионы алюминия, кислорода и азота на выходе из импульсного сопла длиной $\approx 200 - 300$ мкм и диаметром ≈ 100 мкм, формирующегося в результате воздействия серии сдвоенных лазерных импульсов на микроканал при пробивке мишени.

На примере синтеза нанопорошков показано, что использование 10 – 15 высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов в серии позволяет получать смешанные нанопорошки, содержащие преимущественно наночастицы Al размером 55 – 60 нм. При использовании количества импульсов в серии порядка 50 – 60 преимущественно образуются порошки, содержащие Al_2O_3 , с размером наночастиц 30 – 38 нм, небольшое количество нитрида алюминия AlN с размером наночастиц 18 – 20 нм и Al.

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ, РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕДИЦИНЕ

Спектры двухфотонно возбуждаемой флуоресценции (ДФВФ)

Исследования Е. С. Воропай начал, выполняя в Институте физики курсовую и дипломную работы. По результатам последней им в соавторстве с А. М. Саржевским и Б. А. Сотским была опубликована статья «Определение функции когерентности излучения рубинового квантового генератора по наблюдению дифракции». В аспирантуре Института физики Е. С. Воропай продолжил работу с применением лазерных источников, начав исследование спектральных характеристик при интенсивном оптическом возбуждении. Основное внимание уделялось изучению двухфотонных процессов. Первые работы по измерениям ДФВФ для сложных органических соединений были выполнены на примере кристаллического антрацена при моноимпульсном возбуждении рубинового лазера. Было отмечено отличие спектров флуоресценции, заключающееся в смещении в коротковолновую сторону примерно на частоту нормального колебания (~ 1400 см⁻¹). Проведенное детальное исследование спектров ДФВФ и кристаллического и растворов антрацена, а также растворов других

сложных молекул позволило установить, что спектры ДФВФ совпадают со спектрами флуоресценции (наблюдавшиеся в данных исследованиях отличия были обусловлены методическими аспектами). Это позволило установить закон независимости спектра флуоресценции сложных молекул от длины волны возбуждения и на случай нелинейного двухквантового возбуждения.

Поляризация двухфотонновозбуждаемой флуоресценции

Были рассмотрены все основные закономерности поляризованной люминесценции растворов сложных молекул. Расчеты степени поляризации ДФВФ $P_{2\phi}$ выполнены на основании осцилляторной модели. Процесс поглощения моделировался посредством двух параллельных осцилляторов поглощения и ориентированного под определенным углом осциллятора испускания. Основываясь на спектральных исследованиях предполагалось, что за испускание ответственные переходы из тех же возбужденных состояний, что и при одноквантовом возбуждении. Получено аналитическое соотношение, связывающее предельное значение степени поляризации $P_{2\phi}$ с углом α между осциллятором испускания и параллельными осцилляторами поглощения:

$$P_{2\phi} = \frac{3 \cos^2 \alpha - 1}{\cos^2 \alpha + 2}.$$

Полученная формула схожа с известной формулой Левшина — Перрена для одnofотонно возбуждаемой флуоресценции.

Анализ выявленного соотношения позволил установить, что ДФВФ более анизотропна (интервал изменения степени поляризации от $2/3$ до $-1/2$) в сравнении с одnofотонной люминесценцией (значения степени поляризации от $1/2$ до $-1/3$). Аналогичные выводы сделаны и на основании квантово-механических расчетов с использованием матрицы плотности. Был выполнен расчет предельного значения степени поляризации для n -квантового процесса возбуждения при параллельности всех n -осцилляторов поглощения и одного осциллятора испускания. Получено, что предельное значение степени поляризации определяется выражением

$$P_{n\phi} = n / (n + 1).$$

На основании теоретически рассчитанных поляризационных диаграмм для ДФВФ для всех возможных комбинаций осцилляторов, а также результатов экспериментальных измерений поляризационных зависимостей установлено, что двухквантовые процессы для сложных молекул описываются двумя π -осцилляторами поглощения и одним π -осциллятором испускания. Доказано, что обнаруженная значительная (изменение до 50 % от максимального значения) спектральная неоднородность $P_{2\phi}$ ДФВФ может быть интерпретирована при учете второго приближения теории электронно-колебательного взаимодействия.

На основании проведенного анализа взаимосвязи измеренных значений $P_{2\phi}$ ДФВЛ при оптических переходах на состояния, характеризующие длинноволновой полосой поглощения, с ориентацией осциллятора коротковолновой полосы поглощения показано, что состояния этой полосы участвуют в формировании промежуточных уровней. Результаты расчетов, выполненных для двух моделей с различной ориентацией перехода с основного на промежуточный уровень, согласуются с данными эксперимента. Выполненные измерения относительных сечений поглощения при двухквантовых переходах на состояния, характеризующие длинноволновую полосу поглощения, подтверждают выводы, сделанные на основании поляризационных исследований.

Как и в случае однофотонно возбуждаемой люминесценции, наиболее однозначную информацию о мультиплетности поглощающих и излучающих систем дают поляризационные диаграммы. Для их определения классически и квантомеханически выполнен расчет зависимости степени поляризации излучения от угла между электрическими векторами возбуждающих потоков. Для модели с одним промежуточным состоянием в рамках осцилляторной модели выполнены расчеты степени поляризации ДФВФ от угла поворота направления поляризации возбуждающих световых потоков и угла наблюдения для всех возможных комбинаций π - и σ -осцилляторов — поляризационных диаграмм ДФВФ. Экспериментальные измерения, проведенные для ряда производных фталимида, показали, что ДФВФ описывается моделью трех π -осцилляторов. Это подтвердило обоснованность использования осцилляторной модели при описании характеристик ДФВФ.

Исходя из обнаруженных значительных изменений степени поляризации ДФВФ по спектру флуоресценции, а также при изменении суммарной частоты двухквантового возбуждения в пределах основной полосы поглощения для расчета выбрана модель, в которой учтено электронно-колебательное взаимодействие во втором порядке

теории возмущений. Характер теоретических зависимостей согласуется с экспериментальными и подтверждает тот факт, что конечными состояниями для двухквантового перехода рассматриваемой природы являются электронно-колебательные состояния.

Данные исследования были обобщены в кандидатской диссертации Е. С. Воропая (1973). В последующем при работе в НИИ ПФП и затем на кафедре лазерной физики и спектроскопии исследования по изучению спектрально-люминесцентных характеристик сложных молекулярных систем при интенсивном оптическом возбуждении были существенно расширены в плане как процессов и явлений, так и круга объектов, а также используемых для этой цели методов и аппаратуры. Большое внимание было уделено детальному исследованию спектрально-поляризационных характеристик растворов сложных молекул при световом тушении. Указанное явление проявляется в изменении интенсивности флуоресценции при воздействии интенсивного невозбуждающего излучения. Из сравнения спектральных зависимостей коэффициентов Эйнштейна для вынужденных переходов, полученных методом светового тушения, с определенными из спектров люминесценции установлено, что для большинства изученных сложных молекул основным каналом светового тушения являются вынужденные переходы из первого возбужденного на колебательные подуровни основного состояния.

Был проведен расчет зависимостей степени поляризации от мощности тушащего излучения для двух различных механизмов тушения — «вниз» и «вверх» с использованием для этой цели общей трехуровневой схемы (таблица).

Возможные значения степени поляризации при световом тушении

Степень поляризации	$\eta = \chi = 0$	$\eta = 0; \chi = \frac{\pi}{2}$	$\eta = \frac{\pi}{2}; \chi = 0$	$\eta = \chi = \frac{\pi}{2}$
$\frac{P}{P}$	$\frac{1}{2} \rightarrow 0$	$\frac{1}{3} \rightarrow 0$	$\frac{1}{3} \rightarrow -1$	$\frac{1}{2} \rightarrow -1$
$\frac{P_{zx}}{P_{zx}}$	$\frac{1}{2} \rightarrow 1$	$-\frac{1}{3} \rightarrow \frac{5}{13}$	$-\frac{1}{3} \rightarrow 1$	$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{3}{5}$
$\frac{PP_{zy}}{P_{zy}}$	$\frac{1}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3} \rightarrow \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{1}{2}$
$\frac{PP_{yx}}{P_{yx}}$	$0 \rightarrow 1$	$0 \rightarrow -\frac{1}{7}$	$0 \rightarrow 1$	$0 \rightarrow -\frac{1}{7}$

Примечание. η — угол между направлениями осцилляторов поглощения ($\vec{d}_a$) и тушения ($\vec{d}_q$); χ — угол между направлениями осцилляторов флуоресцен-

ции ($\vec{d}_r$) и тушения ($\vec{d}_q$); вторая строка (P) отвечает параллельной, три остальных — взаимноортогональной ориентации векторов поляризации возбуждающего и тушащего излучений; стрелками указан предел, к которому стремится соответствующее значение степени поляризации при возрастании интенсивности тушащего излучения.

Из таблицы видно, что набор возможных значений индивидуален для каждого из вариантов. Это очень важно, поскольку достигнуть предельных значений в условиях эксперимента не всегда удастся. Тем не менее были проведены исследования для широкого круга соединений различной структуры и с разной взаимной ориентацией переходов с поглощением и испусканием. Варьируя объекты и условия эксперимента были реализованы все следующие из теоретического рассмотрения случаи и модели. Одновременно определены актуальные для различных классов соединений механизмы, обуславливающие переходы с тушением.

На примере ряда производных фталимида и ксантеновых красителей с известной ориентацией осцилляторов перехода в растворах различной вязкости обнаружена существенная зависимость эффективности светового тушения от взаимной ориентации единичных векторов поляризации линейно-поляризованных возбуждающего и тушащего световых потоков, а также осцилляторов поглощения и флуоресценции. Установлено, что максимальная эффективность наблюдается при совпадении по направлению осцилляторов поглощения и флуоресценции, а также при параллельности векторов поляризации возбуждающего и тушащего световых потоков. Минимальная эффективность будет при взаимно перпендикулярной ориентации осцилляторов поглощения и флуоресценции.

Изучение зависимости эффективности по спектру флуоресценции показало, что она увеличивается при переходе к низкочастотному краю полосы флуоресценции. Исследованы также спектральные зависимости степени поляризации флуоресценции для молекул с различной ориентацией осцилляторов поглощения и испускания и взаимной ориентации плоскостей поляризации в большом диапазоне мощностей возбуждающих и тушащих световых потоков. Обнаружены значительные зависимости степени поляризации и эффективности светового тушения в глицериновых растворах и отсутствие таковых в этанольных. Изменение этих характеристик в пределах спектра люминесценции ослабляется при уменьшении частоты возбуждения.

Данный эффект обусловлен ориентационной и спектральной селективностью светового тушения.

Рассчитаны спектрально-поляризационные характеристики растворов в условиях светового тушения, основанные на использовании уравнений баланса и задании спектров люминесценции методом спектральных моментов. Проанализирована зависимость изменения эффективности светового тушения и степени поляризации от сдвига мгновенного спектра люминесценции в процессе релаксации и соотношения между временем жизни и временем релаксации при различной ориентации осцилляторов поглощения и испускания, а также взаимной ориентации векторов поляризации возбуждающих и тушащих световых потоков. Подтверждено, что с ростом сдвига и уменьшением отношения времени жизни ко времени релаксации увеличивается изменение эффективности тушения и степени поляризации. Проведенные исследования спектрально-поляризационных характеристик позволили обосновать механизм светового тушения в сложных органических соединениях в конденсированной фазе.

В работах рассматривались в основном конденсированные среды, главным образом растворы. В этих условиях молекулы исследуемых соединений, как правило, находятся в окружении других молекул и определенным образом взаимодействуют с ними. При небольших концентрациях примесных молекул в основном проявляется их взаимодействие с молекулами матрицы или окружения, а при росте концентрации все более определяющим становится взаимодействие примесных молекул между собой. Все эти взаимодействия находят свое отражение в спектрально-люминесцентных характеристиках молекулярных систем, которые очень активно изучались в 1980-х гг. и обсуждались на конференциях и совещаниях, в том числе посвященных данной тематике. основополагающие работы в этой области были сделаны Н. Г. Бахшиевым с сотрудниками, а также А. Н. Рубиновым и другими в Институте физики АН БССР. Из исследований БГУ по данной проблематике следует выделить работы по изучению основных закономерностей влияния процессов межмолекулярной релаксации и флуктуационного уширения уровней энергии на формирование спектрально-люминесцентных характеристик молекулярных систем с определенными структурными электронно-колебательными спектрами, а также работы по изучению процессов межмолекулярной релаксации при интенсивном возбуждении. Выяснено, что увеличение интенсивности возбуждения может приводить к тому, что некоторые

из молекул после возбуждения могут вторично поглотить возбуждающий квант, не успев прорелаксировать в равновесное с окружением состояние, вызвав так называемую ступенчатую или вынужденную межмолекулярную релаксацию (данное явление было предсказано Н. Г. Бахшиевым). В исследованиях БГУ было установлено, что при вариации мощности возбуждения существуют определенные температурные интервалы, зависящие от вязкости используемого растворителя, в которых с ростом мощности возбуждающего излучения наблюдаются низкочастотные сдвиги спектров люминесценции. Тем самым впервые экспериментально подтверждено явление вынужденной межмолекулярной релаксации, обусловленное раскачкой молекулы за счет оптических переходов с неравновесных ориентационных подуровней основного состояния. Данное явление позволяет формировать в растворе новую систему энергетических уровней и тем самым управлять оптическими свойствами жидких систем. Проанализированы условия, при которых это явление проявляется наиболее отчетливо: в низкочастотном сдвиге спектра люминесценции с ростом мощности возбуждающего излучения. Установлено, что явление вынужденной межмолекулярной релаксации наиболее явно наблюдается в определенном интервале вязкостей (температур), когда изменяемое за счет вариации мощности излучения время жизни сравнимо с характерным временем релаксации.

Проанализировано влияние концентрационного тушения на характер наблюдаемых закономерностей. Установлено, что с ростом интенсивности накачки эффективность концентрационной деполяризации вначале падает, а затем несколько возрастает, что объясняется увеличением времени жизни молекул в возбужденных состояниях за счет подавления концентрационного тушения при насыщении. Результаты проведенных работ показывают, что исследование концентрационной деполяризации люминесценции при воздействии интенсивного излучения позволяет изучать это явление в более широкой области концентраций, чем это возможно в линейной спектроскопии, а также делать выводы о фотофизических процессах, развивающихся под действием лазерного излучения.

Перечисленные работы были выполнены в основном для ряда сложных молекул (производные антрацена, фталимида, родамины). В конце 1980-х гг. исследовались свойства полиметиновых красителей (ПК) с полосами поглощения и флуоресценции в ближней ИК-области для создания лазерных сред. Разработаны методы изучения и синтеза

новых лазерных сред; изучена взаимосвязь фотофизических параметров растворов ПК и дицианометиленовых производных пиранового ряда со структурой молекул; даны рекомендации по направленному синтезу молекулярных систем с требуемыми свойствами для использования их в качестве лазерных сред и методы оптимизации их характеристик. Ряд соединений оказались перспективными в качестве основ для перестраиваемых сред и фототропных затворов, что подтверждено патентами. Результаты легли в основу докторской диссертации Е. С. Воропая «Нелинейная люминесценция растворов сложных молекул и методы ее фотометрии» (1992). Основные из них кратко можно сформулировать следующим образом:

- разработаны основные положения поляризованной ДФВФ: рассчитаны поляризационные характеристики двухфотонно возбуждаемой люминесценции для различных моделей и определены предельные значения степени поляризации;

- определены основные положения люминесценции растворов при световом тушении: разработан спектрально-поляризационный метод измерения спектра флуоресценции и интерпретированы основные особенности проявления релаксационных процессов при световом тушении;

- развиты подходы к изучению и описанию межмолекулярных взаимодействий при высокоинтенсивных потоках, выяснены особенности проявления неоднородного уширения уровней в растворах молекул со структурными электронно-колебательными спектрами и установлено влияние структуры молекул на неоднородное уширение; обнаружено уменьшение концентрационной деполяризации при интенсивном возбуждении и экспериментально подтверждено существование явления вынужденной межмолекулярной релаксации;

- разработаны методы изучения и синтеза новых лазерных сред: изучена взаимосвязь фотофизических параметров растворов ПК и дицианометиленовых производных пиранового ряда со структурой молекул и даны рекомендации по направленному синтезу молекулярных систем с требуемыми свойствами;

- разработаны методы и средства изучения спектрально-поляризационных характеристик нелинейной люминесценции: описаны варианты импульсных источников, фотометрических схем; изучены основные параметры, предложены методы оптимизации; выполнена адаптация ряда внутрирезонаторных методов для измерения нелинейного поглощения.

После защиты диссертации Е. С. Воропай продолжил разработку новых методов и аппаратуры, а также материалов с целью конкретного применения. Следует отметить, что некоторые из полученных им результатов вошли в работу, удостоенную Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники (1994). Началось изучение возможности применения синтезируемых ПК и дицианометиленовых производных пиранового ряда для создания биомедицинских препаратов.

ПРЕПАРАТЫ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

После назначения Е. С. Воропая заведующим кафедрой начались активные исследования спектрально-люминесцентных характеристик соединений, перспективных для создания препаратов для биомедицинских применений. Этой теме была посвящена диссертационная работа **Кирилла Николаевича Каплевского** «Симметричные индотрикарбоцианиновые красители в растворах и биологических структурах: ионные равновесия, фотоника, фотоцитотоксичность», защищенная в 2005 г. (научный руководитель — профессор М. П. Самцов).

В качестве объектов исследования выбраны уже известные и новые симметричные индотрикарбоцианиновые красители. Особое внимание было уделено новому отечественному фотосенсибилизатору ТИКС, а также специально синтезированным для данной работы катионным аналогам этого красителя с анионами Γ^- и BF_4^- .

В результате проведенных исследований доказано, что образование ионных пар ПК при переходе к малополярным растворителям, наряду с изменениями в электронных спектрах поглощения и испускания, проявляется в поляризационных спектрах и спектрах возбуждения флуоресценции. Впервые установлено, что ионная форма молекул ПК влияет на положение и вероятности переходов не только для первого возбужденного, но и более высоких синглетных состояний молекул. В коротковолновой области выявлено значительное влияние среды на спектры поглощения, возбуждения и испускания, поляризационные спектры, время жизни и квантовый выход флуоресценции. Установлено, что выход образования синглетного кислорода выше для молекул красителя с анионами, способствующими смещению ионного равновесия в сто-

рону увеличения доли контактных ионных пар, а также с анионами, содержащими тяжелые атомы. Впервые выявлена корреляция величины квантового выхода необратимых фотопревращений ПК с эффективностью генерации синглетного кислорода различными типами ионных форм красителей. Показано, что в клетках HeLa в диапазоне нетоксичных концентраций ПК находятся в мономерном состоянии, локализованы в области с низкой диэлектрической проницаемостью, связываются с биологическими макромолекулами и не контактируют с водной средой. Установлено, что в клетках молекулы красителя находятся преимущественно в виде контактных ионных пар, у красителя с анионом Br^- проявляется присутствие свободных катионов или сольватноразделенных ионных пар. Показано, что смещение ионного равновесия в сторону контактных ионных пар для красителей в клетках (по сравнению с малополярными органическими растворителями) обусловлено достаточно высокой концентрацией солей в биосистеме.

Установлено, что уменьшение фотоцитотоксичности ПК в клетках HeLa для больших плотностей мощности при постоянной экспозиционной дозе света происходит из-за фотодеструкции красителей и уменьшения концентрации кислорода. Выявлено, что исследованные красители сохраняют фотоцитотоксичность в гипоксических условиях, эффективность которой в значительной степени зависит от природы аниона красителя. Доказано, что ПК обеспечивают большую глубину повреждения опухолевых тканей *in vivo* в результате фотовоздействия излучением с $\lambda = 740$ нм.

Целями диссертационной работы **Дмитрия Георгиевича Мельникова** «Фотофизические свойства трикарбоцианиновых красителей в растворах и комплексах с биополимерами», защищенной в 2008 г. (научный руководитель — профессор Е. С. Воропай) являлись установление закономерностей протекания фотофизических процессов в индотрикарбоцианиновых красителях в растворах и комплексах с полимерами, природы окружения и механизма фотоактивности ПК в живом организме и типографских красках, оптимизация на основе полученных данных условий применения ПК в качестве фотосенсибилизатора с целью диагностики и лечения рака и флуоресцентных ИК-спецметок для защиты ценных бумаг.



Д. Г. Мельников

В результате исследований определена эффективность фотосенсибилизации красителями образования синглетного кислорода в дейтерированных растворителях. Показано, что в малополярных растворителях выход генерации синглетного кислорода выше для трикарбоцианиновых красителей, которые находятся в состоянии контактных ионных пар, а также содержащих в анионе тяжелый атом йода. В полярном дейтерированном ацетонитриле отсутствует влияние противоиона на эффективность фотосенсибилизации кислорода красителями. Впервые установлено, что с увеличением концентрации трикарбоцианинового красителя в малополярных растворах увеличивается эффективность генерации синглетного кислорода в результате увеличения в растворе доли контактных ионных пар.

Обнаружена сверхбыстрая трансформация нестационарных спектров в полосе просветления красителя НПТС. Дана интерпретация наблюдаемых эффектов в рамках представлений о «выжигании провала» в контуре неоднородно уширенной электронно-колебательной полосы $S_0 \rightarrow S_1$ -поглощения. Обнаружены качественные различия в регистрируемых спектрах поглощения из возбужденных электронных состояний красителя для мало- и высокополярных растворителей. Доказано, что наблюдаемые различия обусловлены сверхбыстрым переносом заряда в контактных ионных парах, что приводит к образованию свободных радикалов. Доказано, что наряду с механизмом фотоповреждения опухолевых тканей путем генерации синглетного кислорода трикарбоцианиновыми красителями существует механизм образования свободных радикалов.

На основании сравнения спектральных характеристик ПК в культуре раковых клеток HeLa и живом организме сделано заключение, что молекулы красителя в ткани и модельной среде раковых клеток имеют практически одинаковое окружение. Следовательно, основные фотофизические свойства достаточно хорошо моделируются при их исследовании в культуре раковых клеток HeLa. Впервые установлено, что *in vivo* молекулы красителя локализованы в области с низкой диэлектрической проницаемостью среды и, как в условиях *in vitro*, молекулы ПК находятся преимущественно в состоянии контактных ионных пар.

На основании анализа результатов численных расчетов показано, что обнаруженная деформация спектра ПК *in vivo* после фотовоздействия в облученной части опухоли обусловлена повышением концен-

трации метгемоглобина до 50 % от общей концентрации гемоглобина в крови, остальные 50 % приходятся на оксигемоглобин (около 30 %) и дезоксигемоглобин (около 20 %). Сделано заключение, что основной причиной деформации спектра флуоресценции в процессе сеанса фотохимиотерапии является изменение соотношения форм гемоглобина в крови. Впервые показано, что анализ спектральных данных ПК при фотовоздействии позволяет прогнозировать глубину и обширность полученного некроза опухоли, оптимизировать эффективность лечения путем подбора дозы и плотности мощности светового излучения с учетом индивидуальных особенностей пациента.

Установлено, что при фотовоздействии на индотрикарбоцианиновый краситель в культуре клеток HeLa светом с $\lambda = 668, 740$ и 780 нм при одинаковой поглощенной дозе происходит повреждение клеток с одинаковой эффективностью, в то время как *in vivo* степень повреждения опухолей возрастает с увеличением длины волны фотооблучения, что связано как с различием в пропускании тканями длины волны, так и фотодиссоциацией комплексов гемоглобина в кровеносных сосудах.

Результаты исследований могут быть применены при лечении онкологических заболеваний путем фотохимиотерапии и диагностики области локализации злокачественных новообразований. Установлено, что при увеличении длины волны фотооблучения до 780 нм значительно повышается эффективность повреждения опухолевой ткани при фотохимиотерапии с использованием ПК. Спектральные данные ПК *in vivo* позволяют оценивать уровень оксигенации ткани и учитывать изменения, происходящие в ткани в процессе фотодинамической терапии (ФДТ), что имеет важное значение в качестве элемента контроля при проведении сеансов лазерной фотохимиотерапии и оптимизации условий лечения рака с помощью данного метода. Установление механизма образования свободных радикалов в результате переноса заряда с катиона красителя на анион и присутствия *in vivo* трикарбоцианиновых красителей преимущественно в форме контактных ионных пар позволяет использовать ПК в качестве эффективного фотосенсибилизатора в опухолевых тканях с пониженным содержанием кислорода.

Результаты исследования фотофизических свойств трикарбоцианиновых красителей в растворах и биополимерах легли в основу применения ПК в качестве флуоресцентных инфракрасных меток для защиты ценных бумаг, документов и товаров от подделки.

Определенный класс ПК — трикарбоцианиновые красители — исследовались в диссертационной работе **Людмилы Сергеевны Ляшенко** «Фотофизика фотоактивных антимикробных трикарбоцианиновых красителей», защищенной в 2011 г. (научный руководитель — профессор М. П. Самцов). Целью диссертационной работы являлось установление закономерностей протекания фотохимических процессов в симметричных трикарбоцианиновых красителях, влияния на них физико-химических параметров среды и возбуждающего излучения, выработка на этой основе рекомендаций по оптимизации условий применения ПК в качестве фотосенсибилизаторов для диагностики и лечения рака и фотодинамической антибактериальной терапии. В результате проведенных исследований установлено, что для уменьшения влияния собственного свечения биотканей при регистрации флуоресценции в спектральном диапазоне 710 — 900 нм *in vivo* следует использовать для возбуждения излучение лазерных источников с длиной волны более 676 нм. Показано, что для обеспечения пропорциональности сигнала флуоресценции фотосенсибилизатора его концентрации *in vivo* необходимо контролировать глубину проникновения света и форму спектров флуоресценции на протяжении всего времени наблюдения при введении нескольких концентраций фотосенсибилизатора. Показано, что путем увеличения площади поверхности регистрации излучения и ослабления механической нагрузки при съеме информации *in vivo* разброс интенсивности в спектрах флуоресценции фотосенсибилизатора уменьшается примерно на порядок. Установлено, что имитирующие меры на основе целлюлозы и ПК могут достаточно долго сохранять неизменными флуоресцентные свойства, обеспечивают возможность регистрации концентрации фотосенсибилизатора в тканях *in vivo* и контроль стабильности параметров спектрометра.

Установлено, что форма и положение максимума спектра флуоресценции индотрикарбоцианинового красителя в опухолевых и нормальных тканях *in vivo* изменяются с течением времени после его внутривенного введения. На основании анализа спектральных свойств красителя *in vivo* и в плазме крови, кинетики их изменения от времени после введения показано, что у молекулы красителя в живом организме меняется окружение по мере перераспределения фотосенсибилизатора из крови в ткани. Установлено, что в тканях *in vivo* молекулы красителя локализованы в области с низкой диэлектрической проницаемостью среды. Доказано, что изменение соотношения

концентраций различных форм гемоглобина в крови оказывает влияние на положение и форму спектра флуоресценции красителя в тканях *in vivo*.

Выявлено, что при фотовоздействии на краситель в опухолевых тканях происходят изменения положения и полуширины спектров флуоресценции красителя, а в культуре клеток HeLa его спектральные характеристики постоянны. На основании анализа влияния перекрытия спектров поглощения эндогенных биомолекул со спектрами флуоресценции красителя и сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования сделано заключение, что наблюдаемые деформации спектров флуоресценции ПК *in vivo* обусловлены изменением соотношения в опухолевой ткани различных форм гемоглобина. Показано, что спектральные характеристики флуоресцирующего в ближнем ИК-диапазоне ПК коррелируют с глубиной полученного при фотовоздействии некроза опухолевых тканей. Установлено, что некроз опухолевых тканей глубиной до 2 см образуется для всех штаммов S-45, SM-1 и W-256, где в результате фотовоздействия наблюдается увеличение полуширины и коротковолновое смещение спектра флуоресценции ПК, а также не восстанавливается интенсивность его флуоресценции.

Установлено, что при фотовоздействии на трикарбоцианиновые красители в клетках HeLa квантами света разной энергии при обеспечении условия поглощения фотосенсибилизатором одинакового количества фотонов в единицу времени повреждение клеток происходит с одинаковой эффективностью. В экспериментах на животных *in vivo* для двух штаммов опухолей при изменении длины волны фотовоздействия в диапазоне от 668 до 780 нм и поддержании одинакового числа поглощенных квантов света в единицу времени в единице объема опухолей глубина их повреждения возрастает в три раза. Наблюдаемые изменения связаны как с различием в пропускании тканей *in vivo* при увеличении длины волны светового излучения, так и с ростом локальной концентрации кислорода. Установлено, что фотобактерицидная активность трикарбоцианиновых красителей не обусловлена взаимодействием с синглетным кислородом.

Выявлено, что введение в малополярные растворы трикарбоцианинового красителя тетрабутиламмоний бромида приводит к значительным изменениям фотофизических и фотохимических характеристик красителя, которые обусловлены увеличением доли тесных

контактных ионных пар. Показано, что механизм фотодеструкции трикарбоцианинового красителя в обескислороженных растворах не связан с выходом молекул в триплетное состояние. Увеличение квантового выхода фотодеструкции трикарбоцианинового красителя в малополярном растворителе при введении тетрабутиламмоний бромида, а также рост при этом числа образовавшихся радикалов свидетельствует об определяющей роли образования радикалов в фотодеструкции НІТС в обескислороженных растворах.

Сделаны выводы, что различия в форме и положении максимума спектра флуоресценции трикарбоцианинового красителя при регистрации *in vivo* в опухолевых и нормальных тканях обусловлены: а) понижением полярности окружения молекул при перераспределении фотосенсибилизатора из крови в ткани; б) отличием спектров пропускания тканей вследствие изменения концентраций различных форм гемоглобина. Фотохимиотерапевтическое повреждение опухолевых тканей возрастает в три раза при изменении длины волны фотовоздействия в диапазоне от 668 до 780 нм, сопровождается увеличением полуширины и коротковолновым смещением в спектрах флуоресценции трикарбоцианинов *in vivo* и обусловлено различием в пропускании тканей и ростом локальной концентрации кислорода. Необходимыми условиями корректной регистрации флуоресценции фотосенсибилизаторов для области 710 — 900 нм в биотканях *in vivo* являются: а) для снижения уровня фоновой флуоресценции — использование в качестве источников возбуждения лазеров с длиной волны генерации более 670 — 680 нм; б) для обеспечения пропорциональности сигнала флуоресценции фотосенсибилизатора его концентрации — контроль глубины проникновения света в ткань и изменений формы спектров со временем после введения фотосенсибилизатора. Причиной изменения фотофизических и фотохимических характеристик трикарбоцианинового красителя в малополярных растворителях при введении тетрабутиламмоний бромида является увеличение доли тесных контактных пар и образование свободных радикалов в результате сверхбыстрого (≤ 150 фс) переноса электрона между катионом и анионом молекул.

Полученные результаты важны для практических применений. Выявленное повышение эффективности повреждения опухолей при увеличении длины волны фотооблучения и анализ спектральных свойств фотосенсибилизаторов при фотовоздействии применимы для оптимизации лечения опухолей. Полученные результаты по опреде-

лению фотофизических свойств индолениновых трикарбоцианиновых красителей в растворах и в целлюлозе нашли применение в полиграфической промышленности при производстве флуоресцентных инфракрасных меток для повышения степени защиты от фальсификации ценных бумаг и документов, что подтверждено актом о внедрении в технологический процесс РУП «Криптотех». Полученные данные по фотобактерицидной активности индолениновых трикарбоцианиновых красителей свидетельствуют о целесообразности и перспективности поиска среди этой группы соединений новых высокоактивных химиотерапевтических средств, которые найдут применение при лечении инфекционных болезней стафилококковой и грибковой этиологии. Высокая контрастность накопления исследованного водорастворимого комплекса индоленинового трикарбоцианинового красителя с кремофором делает перспективным его применение не только для фотохимиотерапии, но и для оптической диагностики областей локализации злокачественных новообразований.

Полиметиновые красители, исследования спектральных и фотофизических свойств которых проводились К. Н. Каплевским, Е. А. Мельниковой, Л. С. Ляшенко, синтезировались в лаборатории спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко. Одним из основных разработчиков данных соединений является **Александр Анатольевич Луговский** (диссертация «Сенсибилизаторы на основе полиметиновых красителей для фотодинамической терапии опухолей», защищенная в 2012 г. по специальности «органическая химия» (научный руководитель — профессор Е. С. Воропай)).

А. А. Луговский выполнил синтез новых индо-, хино- и пирилотрикарбоцианиновых красителей с ортофениленовым мостиком в хромоформной цепи с мезо-хлор- и мезо-фторзаместителями, ряд которых обладает выраженной фотодинамической и фотобактерицидной активностью. Разработаны методы синтеза мезо-трифторметилзамещенных индотрикарбоцианиновых красителей, исходя из 2-трифторметилиндена, комплексов мезо-хлор- и мезо-трифторметилзамещенных индотрикарбоцианиновых красителей с кремофором и сывороточным альбумином человека, а также методы получения мезо-хлорзамещенных индотрикарбоцианиновых красите-



А. А. Луговский

лей ковалентносвязанных с моносахаридами (*d*-глюкозой и *d*-галактозой) и полиэтиленгликолями различной степени полимеризации (средние молекулярные массы — 200, 300, 600, 4000), которые имеют более низкую токсичность и бóльшие по сравнению с немодифицированными аналогами растворимость в воде, туморотропность и фотодинамическую активность. Проведен синтез новых трикарбоцианиновых красителей с мезо-хлордibenзоциклогептатриеновым фрагментом, имеющих bathochromное смещение максимума поглощения относительно красителей с орто-фениленовым мостиком в хромофоре, разработан новый подход к синтезу на основе этиленкетала ацетоуксусного эфира 6-арилпиронов, полупродуктов для получения мероцианиновых красителей.

Исследования наиболее перспективных для ФДТ соединений было продолжено **Дмитрием Сергеевичем Тарасовым** в диссертации «Фотофизические свойства индотрикарбоцианиновых красителей с полиэтиленгликолями для фотодинамической терапии», защищенной в 2019 г. (научные руководители — профессор Е. С. Воропай и профессор М. П. Самцов).

Целью работы являлось установление закономерностей протекания фотофизических процессов в новых симметричных индотрикарбоцианиновых красителях с объемными заместителями в растворах и биологических структурах, выработка на этой основе рекомендаций по оптимизации условий применения красителей в качестве фотосенсибилизаторов для ФДТ злокачественных новообразований.

В результате проведенных исследований установлено, что молекулы симметричных индотрикарбоцианиновых красителей, ковалентно связанных с полиэтиленгликолями массой 200 — 400 г/моль, находятся в мономерном состоянии в форме свободных ионов. Показано, что наличие объемных заместителей на концевых группах молекул практически не влияет на положение электронно-колебательных уровней молекул и вероятности переходов между ними.

На основании анализа спектральных и фотофизических характеристик индотрикарбоцианинового красителя НТС с противоионом Γ и ClO_4^- в малополярном хлороформе и дихлорбензоле установлено, что в средах с низкой полярностью при концентрациях менее 10^{-5} м происходит диссоциация красителя на свободные ионы. Доказано, что концентрационное усиление образования синглетного кислорода в малополярных растворах индотрикарбоцианинового красителя НТС с анионом Γ обусловлено ростом с концентрацией доли молекул в фор-

ме контактных ионных пар и проявлением эффекта тяжелого атома аниона Γ^- .

На основании анализа спектрально-люминесцентных свойств индотрикарбоцианинового красителя ПК220 в тканях лабораторных животных *in vivo* и *ex vivo* и в модельных биологических средах установлено, что в биологических объектах краситель переходит из водной среды в окружение с низкой диэлектрической проницаемостью, которое характерно для различных белковых и липидных компонент. Установлено, что краситель способен входить в домены белка как в форме мономеров, так и в форме димеров. Показано, что с увеличением концентрации красителя в биологических средах происходит динамическое тушение его флуоресценции вследствие безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения от мономеров красителя на нелюминесцирующие Н-агрегаты.

Совпадение фотофизических характеристик красителя ПК220 в биологических тканях и сыворотке крови, а также кинетики их трансформации со временем после введения позволяет использовать эту модельную среду для калибровки аппаратуры по определению концентрации фотосенсибилизатора в тканях *in vivo*; определить условия, которые обеспечивают корректное определение спектров и кинетики затухания флуоресценции фотосенсибилизатора в биологических тканях *in vivo*. Установлено, что при микромолярных концентрациях красителя методы контактной флуоресцентной спектрометрии и диффузионной флуоресцентной томографии дают сопоставимые результаты для профиля кинетики накопления в тканях *in vivo* фотосенсибилизатора на основе ПК220.

На основании анализа данных контактной флуоресцентной спектрометрии обнаружено, что как при ФДТ с фотосенсибилизатором на основе красителя ПК220, так и с Фотолон® глубина повреждения опухолевых тканей соответствует величине деформации спектра флуоресценции красителя в области 760 – 880 нм. Установленное изменение формы спектра флуоресценции красителя интерпретировано в рамках модели влияния поглощения излучения различными формами гемоглобина, соотношение которых в облучаемой части опухоли меняется вследствие расхода молекулярного кислорода.

Полученные результаты по оптимизации условий проведения сеансов ФДТ на лабораторных животных позволили обеспечить высокую

эффективность фототерапии при использовании новых индотрикарбоцианиновых фотосенсибилизаторов. Показано, что путем анализа флуоресценции индотрикарбоцианиновых красителей в спектральном диапазоне 760 — 880 нм на разных стадиях фотодинамического воздействия *in vivo* с фотосенсибилизатором Фотолон® можно диагностировать эффективность фототерапии.

По результатам исследования фотофизических свойств новых индотрикарбоцианиновых красителей в биологических системах разработана и внедрена методика фармакокинетических исследований накопления фотосенсибилизаторов, активируемых излучением ближнего инфракрасного диапазона в опухолевых тканях экспериментальных животных *in vivo*. Результаты исследования фотофизических свойств трикарбоцианиновых красителей в растворах использованы в технологическом процессе производства флуоресцентных инфракрасных меток для документов строгой отчетности.

Учитывая то, что полосы поглощения и флуоресценции ряда ПК приходятся на область терапевтического окна, они рассматриваются как перспективные соединения для создания флуоресцентных меток и флуоресцентных зондов. Эти вопросы рассматривались в диссертации **Никиты Викторовича Белько** «Фотофизика наноструктурированных форм индотрикарбоцианиновых красителей», защищенной в 2021 г. (научный руководитель — профессор М. П. Самцов).

Целями работы являлись: изучение фотофизических свойств индотрикарбоцианиновых красителей с ортофениленовым мостиком в цепи сопряжения при образовании наноструктурированных агрегатов, установление закономерностей взаимодействия красителей с наночастицами алмаза и биологическими структурами.



Н. В. Белько

Установлено, что в результате самоорганизации молекул индотрикарбоцианинового красителя при концентрации выше 2 мкмоль/л в водном растворе формируются Н*-агрегаты, которые не флуоресцируют и обладают узкой полосой поглощения с максимумом при 514 нм и полушириной $\sim 800 \text{ см}^{-1}$. Показано, что Н*-агрегаты сохраняют свои свойства при осаждении на подложки, представляют собой

наноструктуры с высотой ~ 10 нм, шириной ~ 100 нм, длиной ~ 1 мкм и проявляют фотоэлектрохимическую активность. Выявлено, что в результате увеличения объема молекулы красителя путем замены двух метильных групп на этильные процесс самоорганизации H^+ -агрегатов останавливается.

На основании анализа нестационарных спектров поглощения установлено, что H^+ -агрегаты индотрикарбоцианинового красителя обладают не только интенсивной полосой поглощения при 514 нм, смещенной в коротковолновую область относительно спектра мономеров, но и длинноволновой полосой поглощения при 756 нм. Быстрая компонента релаксации просветления в полосе H^+ -агрегатов, которая протекает с временной постоянной ~ 3 пс, обусловлена прямым переходом с верхнего края экситонной зоны в основное состояние, а медленная компонента с временной постоянной ~ 30 пс — конкурирующей релаксацией на нижний край экситонной зоны с последующим переходом в основное состояние.

Установлено, что в результате формирования комплексов индотрикарбоцианинового красителя с наноалмазами электронный спектр поглощения смещается bathochromно. На основании анализа спектров ИК-поглощения показано, что ведущую роль в комплексообразовании играют карбоксильные группы красителя. В присутствии сыворотки крови человека молекулы красителя десорбируются с поверхности наноалмазов и связываются с сывороточными белками, что сопровождается изменением формы спектра флуоресценции красителя и ростом ее интенсивности более чем на порядок, а также увеличением времени жизни флуоресценции от 0,5 до 1,8 нс.

По результатам исследования процесса H^+ -агрегации индотрикарбоцианинового красителя в водном растворе разработана экспресс-методика спектрофотометрического контроля показателей качества модифицированного полиэтиленгликолем фотосенсибилизатора. Она способствует оптимизации условий хранения и стерилизации нового фотосенсибилизатора для фотодинамической терапии и позволяет контролировать чистоту его растворов непосредственно перед внутривенной инъекцией. Комплексы индотрикарбоцианинового красителя с наноалмазами могут использоваться в качестве флуоресцентных био-зондов, позволяющих обнаруживать белки сыворотки крови в водной среде и определять их концентрацию по увеличению интенсивности и времени жизни флуоресценции красителя в ближней ИК-области.

ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ

Многоволновые взаимодействия в резонансных средах на основе записи динамических голограмм

Исследования в области динамической голографии, инициированные А. С. Рубановым, ведут на кафедре с 1980-х гг. Под руководством А. В. Чалея, а затем А. Л. Толстика сформировалась группа нелинейной оптики, основными направлениями научных изысканий которой стал широкий круг нелинейно-оптических явлений, таких как динамическая голография, обращение волнового фронта, эффекты самоорганизации в нелинейных системах и оптическая обработка информации.

В 2000 г. была защищена кандидатская диссертация **Олега Геннадьевича Романова** «Четырехволновое взаимодействие в интерферометре Фабри — Перо с резонансной нелинейностью» (научные руководители — А. С. Рубанов и А. Л. Толстик). О. Г. Романов начал работать над проблемами четырехволнового взаимодействия в резонансных средах, будучи студентом 3-го курса. В дипломной работе им были рассмотрены особенности преобразования световых полей при невырожденном по частоте четырехволновом взаимодействии. О. Г. Романов использовал методы численного моделирования процессов четырехволнового взаимодействия, которые он существенно развил, обучаясь в аспирантуре, при переходе к динамическим задачам взаимодействия пространственно-ограниченных световых пучков.



О. Г. Романов

Актуальность исследований О. Г. Романова обусловлена использованием схем четырехволнового взаимодействия при решении задач по преобразованию пространственно-временной структуры световых полей. Резонаторные оптические системы являются удачными объектами для исследования эффектов самоорганизации и развития представлений о кооперативных процессах в пространственно-распределенных системах. В нелинейных интерферометрах реализуются различные виды обратной связи: внешняя (при отражении от зеркал резонатора) и распределенная поперечная, вызванная дифракцией излучения. Коге-

рентное внутрирезонаторное взаимодействие световых пучков обеспечивает реализацию дополнительного вида продольно распределенной обратной связи при рассеянии на динамических решетках, записываемых в объеме среды. Сочетание бистабильных свойств нелинейного интерферометра с процессами энергообмена между световыми пучками при внутрирезонаторном четырехволновом взаимодействии существенно расширяет функциональные возможности систем оптического управления информационными световыми потоками.

В диссертации теоретически исследована схема взаимодействия двух световых пучков в нелинейном интерферометре в геометрии нормального падения волны накачки и наклонного падения сигнальной волны. Показано, что вследствие перераспределения волн на записываемых динамических решетках и переотражения их от зеркал резонатора образуются световые пучки в новых направлениях и имеет место шестиволновое взаимодействие. Доказана возможность реализации оптической бистабильности для слабых сигнальных полей в условиях бистабильного поведения волны накачки. Определены условия реализации бистабильности *S* и *N*-типа и типа «баттерфляй» для сигнальных и фазово-сопряженных волн.

Повышенный интерес вызывает анализ условий реализации симметричной и асимметричной оптической бистабильности. Доказано, что причиной возникновения асимметрии пропускания интерферометра является распределенная обратная связь внутри объема нелинейной среды, возникающая вследствие дифракции на фазовых динамических решетках. Определены области реализации асимметрии пропускания в зависимости от параметров лазерного излучения, резонатора и нелинейной среды. Исследована устойчивость стационарных состояний пропускания интерферометра и показано, что нарушение симметрии пропускания происходит вследствие виллообразной бифуркации симметричного решения. Доказано, что после достижения квазистационарного состояния с одинаковым пропусканием для двух волн равной входной интенсивности система переходит к устойчивому состоянию с различным пропусканием.

В свою очередь, нестационарный энергообмен между световыми волнами определяет возможность реализации различных динамических режимов работы интерферометра при постоянной входной интенсивности: асимметричных (автоколебания относительно состояний интерферометра с различным пропусканием), переключаемых (режим поочередного пропускания двух световых пучков) и нерегуляр-

ных самопульсаций. Определены закономерности пространственно-временного структурирования световых полей в нелинейном интерферометре при учете дифракционного механизма поперечного взаимодействия. Для схемы наклонного падения двух световых пучков на интерферометр показано, что конкуренция процессов поперечного сноса излучения и асимметрии пропускания может приводить к формированию различных типов профилей двух световых пучков на выходе интерферометра. В случае, когда определяющую роль играет эффект нарушения симметрии пропускания интерферометра, на выходе два пучка существенно различаются по интегральной интенсивности. Если скорость поперечного сноса излучения превышает скорость развития асимметрии пропускания, тогда формируются зеркально симметричные пучки с одинаковой интегральной интенсивностью. Учет нестационарного энергообмена между световыми пучками предсказал возможность реализации асимметричных самопульсаций поперечных профилей интенсивности пучков.

Приведенные результаты теоретического исследования эффекта оптической би- и мультистабильности и процессов формирования пространственно-временных структур световых полей в нелинейных интерферометрах иллюстрируют широкие возможности их использования в разнообразных системах управления пространственной структурой лазерных пучков, генерации регулярных и хаотических пульсаций интенсивности, а также при создании перестраиваемых логических элементов. Не менее важно отметить богатую физику процессов в нелинейных интерферометрах как распределенных нелинейных системах с обратной связью. Присущие таким системам разнообразные эффекты пространственных преобразований световых полей представляют несомненный фундаментальный интерес, позволяя рассчитывать на обнаружение новых режимов нелинейно-оптических преобразований световых пучков, разработку эффективных способов управления лазерным излучением, развитие методов оптической обработки информации. Учитывая взаимосвязь сигнала на выходе интерферометра со спектрально-оптическими характеристиками среды, перспективно использование рассмотренных схем многоволнового взаимодействия для высокочувствительной диагностики и измерения параметров нелинейных сред.

Исследования в области четырехволнового взаимодействия и записи динамических голограмм были выполнены в 2001 г. в защищенной кандидатской диссертации «Четырехволновое взаимодействие

и управление дифракционной эффективностью динамических решеток в резонансных средах» (научные руководители — А. С. Рубанов и А. Л. Толстик) **Сергея Михайловича Карпука**. Повышенный интерес к этим исследованиям обусловлен широким использованием динамических голограмм, четырехволнового взаимодействия, основанного на записи и считывании объемных динамических решеток, а также эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) для решения разнообразных задач оптической обработки информации, коррекции пространственной структуры световых полей в реальном времени и компенсации фазовых искажений при распространении световых пучков через неоднородные среды. Использование для записи динамических решеток резонансных сред является перспективным в связи с их большим разнообразием (жидкие и твердые растворы красителей, активированные кристаллы, кристаллы с центрами окраски и т. д.), позволяющим осуществлять эффективное взаимодействие в широком диапазоне интенсивностей и длительностей световых импульсов. Ряд практических применений голографических методов обработки оптической информации требует разработки управления дифракционной эффективностью динамических голограмм и осуществления частотного преобразования когерентных изображений.

Были реализованы новые методы управления энергетической эффективностью четырехволнового взаимодействия и исследована эффективность восстановления динамических решеток на смещенной частоте в условиях как линейной, так и нелинейной голографической записи. Интерес к таким исследованиям обусловлен возможностью реализации частотного преобразования объемных (3D) изображений, включая визуализацию ИК-изображений. Была построена теоретическая модель невырожденного четырехволнового смешения в условиях нелинейной записи динамических голограмм в многоуровневых резонансных средах и впервые экспериментально реализовано преобразование объемных (3D) изображений из ИК-области (1064 нм) в видимую (532 нм) при дифракции на динамических голограммах в растворе ПК № 3274У. Показано соответствие результатов эксперимента и теоретических расчетов, выполненных для трехуровневой модели резонансной среды, учитывающей переходы в основном и в возбужденном синглетных каналах. Проведено экспериментальное и теоретическое сравнение эффективности восстановления динамических решеток на удвоенной частоте для различных схем невырожденного четырехволнового взаимодействия. Определены оптимальные усло-

вия реализации процесса четырехволнового смешения в зависимости от интенсивности взаимодействующих волн и оптической толщины среды. Сопоставление схем, основанных на линейной и квадратичной записи динамических голограмм, проиллюстрировало возможность эффективного частотного преобразования световых пучков в обоих случаях при оптимизации условий взаимодействия.

Была разработана теоретическая модель четырехволнового взаимодействия с использованием дополнительной независимой волны — оптической подкачки, позволяющей управлять эффективностью взаимодействия. Установлено, что оптическая подкачка в возбужденном канале (между возбужденными синглетными уровнями) приводит к записи в объеме среды термоиндуцированных интерференционных решеток, участвующих в процессе четырехволнового ОВФ и обуславливающих увеличение дифракционной эффективности динамических голограмм. Экспериментально реализовано некогерентное усиление динамических решеток в растворе красителя родамин-6Ж. Показано, что при небольших интенсивностях подкачки вследствие разных знаков резонансной (на частоте взаимодействия) и тепловой нелинейности наблюдалось некоторое снижение коэффициента отражения обращенной волны. Для интенсивности подкачки $\sim 70 \text{ МВт/см}^2$ резонансное и тепловое изменения показателя преломления компенсировали друг друга. При этом формирование обращенной волны обусловлено дифракцией только на амплитудных динамических решетках. Дальнейший рост интенсивности подкачки приводил к доминированию тепловых динамических решеток, характеризующихся высокой дифракционной эффективностью, обуславливая увеличение коэффициента отражения обращенной волны. Экспериментально получено увеличение энергетической эффективности ОВФ более чем в три раза.

Первые эксперименты по нелинейной голографической записи в растворах красителей показали широкие возможности использования многоволновых взаимодействий, реализуемых в средах с нелинейностями пятого и более высоких порядков, для обработки и коррекции световых полей в реальном времени, передачи информации (изображений) с одних пучков на другие, осуществления логических и математических операций, создания бистабильных устройств и элементов адаптивной оптики. Постоянный интерес к подобным исследованиям связан с возможностью привнесения в технику обработки информации преимуществ оптических методов, включая параллельность обработки сигналов и коммутацию большого числа каналов, прямое хранение

изображений и осуществление интегральных преобразований типа корреляции и свертки. Оптический диапазон частот обеспечивает более широкую полосу пропускания и, соответственно, предельно допустимое быстродействие по сравнению с радиочастотным диапазоном.



А. Л. Толстик (в центре), С. М. Карпук, Омар Ормачеа
и О. Г. Романов (слева направо) при посещении университета
г. Майнц (Германия, 2004)

Исследованиям многоволнового взаимодействия в резонансных средах и сопутствующих процессов преобразования световых полей была посвящена докторская диссертация **Алексея Леонидовича Толстика** «Многоволновые интерференционно-голографические процессы преобразования световых полей в резонансных средах» (2003). Целями работы являлись: развитие теории многоволновых взаимодействий в сложных молекулярных средах в условиях проявления внутренней (рассеяние на динамических решетках) и внешней (резонаторной) обратной связи; установление закономерностей преобразования световых полей динамическими голограммами и нелинейными интерферометрами; разработка и реализация новых нелинейно-оптических методов управления энергетическими и пространственно-временными характеристиками световых пучков.

Впервые рассмотрен и решен ряд актуальных вопросов взаимодействия когерентных световых полей в многоуровневых резонансных

средах. Построена теория вырожденного и невырожденного по частоте многоволнового взаимодействия при проявлении (наряду с кубической) нелинейностей пятого и более высокого порядка. Выявлено влияние переходов между возбужденными уровнями молекул на эффективность многоволнового взаимодействия. Предложен и исследован механизм управления нелинейной восприимчивостью резонансной среды с использованием дополнительного светового пучка (оптической подкачки), что позволило увеличить дифракционную эффективность динамических голограмм и осуществить управление режимами работы нелинейного интерферометра. Проанализированы возможности обращения волнового фронта с одновременным преобразованием частоты сигнальной волны, предложены и исследованы методы получения различных типов оптической бистабильности, пространственного гистерезиса, регулярных и хаотических пульсаций интенсивности.

В основу теоретического рассмотрения многоволнового взаимодействия положено разложение пространственного распределения светоиндуцированного амплитудно-фазового отклика среды в ряд по гармоникам динамических решеток, формируемых в объеме среды всеми взаимодействующими волнами. Указанный подход позволяет не ограничиваться кубической нелинейностью, а корректно учесть нелинейности высших порядков, приводящих к появлению вторых и более высоких компонент разложения нелинейной восприимчивости среды в ряд Фурье.

Анализ укороченных волновых уравнений для схемы вырожденного по частоте взаимодействия (когда в объеме среды каждая пара волн записывает свою динамическую решетку), выполненный с учетом брэгговского отражения от объемных динамических голограмм, позволил записать для взаимодействующих волн систему дифференциальных уравнений следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{V \partial t} + \frac{\Delta_{\perp}}{2ik} \right) E_1 &= \frac{i2\pi\omega}{cn_0} [\chi_{0,0} E_1 + \chi_{1,1} E_2 + \chi_{1,0} E_S + \chi_{1,-M,1} E_D] \\ \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{V \partial t} + \frac{\Delta_{\perp}}{2ik} \right) E_2 &= -\frac{i2\pi\omega}{cn_0} [\chi_{-1,-1} E_1 + \chi_{0,0} E_2 + \chi_{0,-1} E_S + \chi_{-M,0} E_D] \\ \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{V \partial t} + \frac{\Delta_{\perp}}{2ik} \right) E_S &= \frac{i2\pi\omega}{cn_0} [\chi_{-1,0} E_1 + \chi_{0,1} E_2 + \chi_{0,0} E_S + \chi_{-M,1} E_D] \\ \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{V \partial t} + \frac{\Delta_{\perp}}{2ik} \right) E_D &= -\frac{i2\pi\omega}{cn_0} [\chi_{M-1,-1} E_1 + \chi_{M,0} E_2 + \chi_{M,-1} E_S + \chi_{0,0} E_D] \end{aligned} \right\},$$

где E_1 и E_2 — опорная и считывающая волны соответственно; E_S и E_D — сигнальная и дифрагированная волны соответственно; V — скорость

$$\text{света в среде; } \chi_{m,n} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \chi_{nl}(l) \exp[-i(m\vec{k}_a\vec{r} + n\vec{k}_b\vec{r})] d(\vec{k}_a\vec{r}) d(\vec{k}_b\vec{r}) -$$

компоненты разложения нелинейной восприимчивости среды χ_{nl} в двойной ряд Фурье по гармоникам решеток $\vec{k}_a = \vec{k}_1 - \vec{k}_S$ и $\vec{k}_b = \vec{k}_S - \vec{k}_2$.

Система уравнений получена для N -волнового смешения на нелинейности $(N - 1)$ -порядка, когда дифрагированная волна E_D определяется нелинейной поляризацией $P = \chi^{(N-1)}(E_1 E_S)^M E_2$, где $M = N/2 - 1$ — порядок дифракции. Направление распространения дифрагированной волны следует из условия фазового синхронизма для волновых векторов $\vec{k}_D = M\vec{k}_1 - M\vec{k}_S + \vec{k}_2$, которое может быть выполнено за счет изменения направления распространения считывающей волны или ее частоты. Члены с $\chi_{0,0}$ определяют поглощение взаимодействующих волн; компоненты $\chi_{\pm 1, \pm 1}$, $\chi_{0, \pm 1}$, $\chi_{\pm 1, 0}$ описывают самодифракцию опорной, сигнальной и считывающей волн соответственно; другие компоненты Фурье-разложения определяют формирование волны E_D вследствие брэгговской дифракции в высшие порядки.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования выявили роль переходов между возбужденными состояниями молекул, резонансного и теплового механизмов нелинейности в формировании дифрагированной волны. Показано, что при небольших интенсивностях волн накачки ненасыщенное поглощение с возбужденного уровня обуславливает снижение энергетической эффективности взаимодействия. Включение нелинейных процессов при переходах между возбужденными уровнями приводит к росту энергообмена между пучками и появлению дополнительного максимума в зависимости дифракционной эффективности от интенсивности. Определяющую роль в формировании дифрагированной волны в условиях моноимпульсного возбуждения и интенсивностях, превышающих интенсивность насыщения, играет нагрев среды, обуславливающий заметную фазовую модуляцию, необходимую для реализации высокоэффективного ОВФ. В этом случае возможен режим оптической мультистабильности, который реализуется при эффективном параметрическом энергообмене на фазовых динамических решетках при небольшой интенсивности сигнальной волны (менее 10 % интенсивности волн накачки) и оптической толщине среды, превышающей пороговое значение. При анализе многоволнового смешения указано, что

оптимальная интенсивность записывающих голограмму волн растет с увеличением порядка дифракции, причем в отличие от четырехволнового взаимодействия остаточное поглощение с возбужденного уровня не приводит к росту эффективности многоволновых процессов.

Предложены способы реализации разнообразных преобразований волнового фронта на основе многоволнового взаимодействия световых пучков в резонансных средах. Показано, что в условиях вырожденно-го по частоте взаимодействия увеличение порядка дифракции сопровождается изменением угла считывания и усилением фазовых искажений. При невырожденном взаимодействии (считывание на частоте, кратной частоте записывающих голограмму волн) и дифракции в брэгговском режиме в первый порядок имеет место сглаживание пространственной структуры волнового фронта. Для реализации обращения волнового фронта с одновременным преобразованием частоты излучения предложено использовать второй и более высокие порядки дифракции на объемных фазовых решетках. Продемонстрированы возможности использования схем многоволнового смещения для измерения нелинейных оптических восприимчивостей высших порядков.

Обоснован механизм управления нелинейностью многоуровневых резонансных сред в условиях комбинированного двухчастотного возбуждения. Для управления нелинейно-оптическими процессами предложено использовать дополнительное облучение на частоте, отвечающей резонансным переходам на смежные энергетические уровни. Установлена возможность использования независимой оптической подкачки при поглощении из основного состояния молекул для управления дифракционной эффективностью динамических ОВФ-голограмм, записанных на переходах между возбужденными уровнями среды. При реализации четырехволнового ОВФ в основном спектральном канале $S_0 - S_1$ пространственно однородная подкачка на частоте наведенного поглощения приводит к записи дополнительных тепловых решеток, позволяющих существенно увеличить энергетическую эффективность взаимодействия. Экспериментально реализовано трехкратное усиление ОВФ при оптической подкачке с возбужденного уровня молекул красителя родамин-6Ж, причем оптимизация частоты оптической подкачки позволила наблюдать заметное усиление уже при интенсивностях порядка единиц мегаватт на квадратный сантиметр.

Построены теоретические модели оптической бистабильности в интерферометре Фабри — Перо с многоуровневой резонансной средой. Выявлено влияние переходов между возбужденными состояниями

молекул на условия реализации оптической бистабильности и уточнены ограничения на величину остаточного поглощения в условиях абсорбционной и дисперсионной бистабильности. Продемонстрирована возможность реализации оптической мультистабильности при немонотонной зависимости показателя преломления от интенсивности, обусловленной включением различных резонансных переходов. Рассмотрены переходные процессы в интерферометре с многоуровневой резонансной средой и теоретически обоснована возможность генерации пульсаций интенсивности на выходе интерферометра при постоянной интенсивности на входе за счет конкуренции двух составляющих резонансного механизма нелинейности, обусловленных переходами молекул в разные энергетические состояния. Причем амплитудой, частотой и формой пульсаций можно управлять за счет изменения входной интенсивности. Наряду с конкуренцией вкладов в нелинейный отклик среды двух компонент показателя преломления, пульсации интенсивности могут быть обусловлены совместным влиянием на пропускание интерферометром нелинейных изменений показателя преломления и коэффициента поглощения. Установлено, что переход от регулярных пульсаций к хаотическим может осуществляться через серию бифуркаций удвоения периода колебаний, а также через многопроходовой аттрактор Шильникова. Доказано, что изменение нелинейных свойств резонансной среды при оптической подкачке на частоте наведенного поглощения позволяет осуществить некогерентное управление пропусканием интерферометра и расширить область параметров, для которых реализуются различные режимы работы (дифференциального усиления, оптической бистабильности, дискриминатора, ограничителя, генератора регулярных и хаотических световых импульсов).

Разработаны теоретические модели преобразования световых полей при многоволновом взаимодействии в интерферометре Фабри — Перо с резонансной нелинейностью. Показано, что в схеме нормального падения волн накачки и наклонного падения сигнальной волны дифракция волн на динамических решетках и отражение их от зеркал резонатора приводят к формированию новых световых пучков, позволяющих наблюдать различные типы оптической бистабильности (S , N , «бабочка»). При наклонном симметричном распространении двух пучков в нелинейном интерферометре реализуется асимметричная оптическая бистабильность, которая характеризуется экспоненциальным увеличением первоначально малой разницы входных интенсивностей. Численное моделирование динамики многоволнового

взаимодействия в интерферометре Фабри — Перо с резонансной нелинейностью продемонстрировало возможность реализации разнообразных режимов асимметричных и переключаемых (триггерных) пульсаций интенсивности. В условиях нестационарного энергообмена между пучками при дифракции на внутррезонаторных динамических решетках реализуются пульсирующие пространственно-временные структуры излучения.

В работах по динамической голографии активное участие принимал студент, а потом аспирант кафедры **Ормачеа Муньос Омар Альберто** (Боливия). В настоящее время он является заведующим кафедрой электроники и телекоммуникаций университета *Privada Boliviana*. Создал первый в Боливии твердотельный лазер и недорогой портативный спектрометр на базе смартфонов для измерения пропускания и поглощения.



Ормачеа Муньос
Омар Альберто

Активно занимается прикладными, актуальными для Боливии разработками, создал технологию удаления природного мышьяка из грунтовых вод в неблагополучных районах на основе недорогих коллекторов солнечной радиации и энергоэффективную интеллектуальную систему уличного освещения на базе встроенных технологий и сенсорных сетей. Неоднократный лауреат ежегодных премий Министерства науки и технологий Боливии.

В 2004 г. Омар Ормачеа защитил кандидатскую диссертацию «Формирование нелинейных динамических голограмм в растворах красителей и методы управления многоволновым взаимодействием» (научный руководитель — А. Л. Толстик). Целью работы была оптимизация условий записи динамических голограмм при проявлении нелинейностей пятого и более высокого порядков, а также реализация новых некогерентных методов управления энергетической эффективностью многоволнового взаимодействия. Экспериментально реализована дифракция лазерного излучения в растворах красителей при проявлении нелинейностей высших порядков и исследованы схемы формирования динамических решеток при многоволновых взаимодействиях в многоуровневых резонансных средах с использованием дополнительной световой волны (оптической подкачки) в различных спектральных каналах. Доказано, что такие схемы увеличивают значения дифракционной эффективности взаимодействия

на несколько порядков, при этом оптическая подкачка практически не влияет на процесс голографической записи в основном канале. Указанное обстоятельство позволяет усиливать динамические решетки в линейном режиме, используя весьма большие интенсивности подкачки, вплоть до интенсивности насыщения резонансного перехода между возбужденными энергетическими состояниями молекул. Экспериментально реализовано некогерентное усиление динамических решеток в растворе красителя родамин-6Ж при использовании в качестве оптической подкачки излучения перестраиваемых лазеров на красителях (родамин-С и родамин-6Ж), излучение которых отстроено в полосу поглощения с возбужденного уровня. Было получено трех- и семикратное увеличение дифракционной эффективности для четырех- и шестиволнового взаимодействия соответственно. Необходимо отметить, что частота оптической подкачки подбиралась таким образом, что сечение поглощения на данной длине волны с возбужденного уровня было сравнимо с сечением поглощения с основного состояния, что позволило на один-два порядка снизить интенсивность подкачки.



В лаборатории нелинейной оптики и динамической голографии (2023)

Наиболее интересным достижением было обнаружение существенного увеличения эффективности многоволнового взаимодействия при оптической плотности, превышающей пороговое значение.

Установлено, что последнее определяется условиями генерации в кювете с красителем за счет отражения от торцов кюветы. На этой основе предложен новый метод усиления динамических решеток с использованием генерирующих свойств красителя. В данном случае использовался известный лазерный краситель родамин-6Ж, в котором при достижении режима генерации излучение последней играет роль оптической подкачки с возбужденного уровня. Для шестиволнового взаимодействия экспериментально получено увеличение дифракционной эффективности от интенсивности более чем на порядок. Установлено, что оптическая подкачка в возбужденном канале приводит к записи в объеме среды дополнительных термоиндуцированных дифракционных структур, которые также участвуют в процессе многоволнового взаимодействия и обуславливают увеличение дифракционной эффективности динамических голограмм. Построена теоретическая модель, адекватно описывающая процесс некогерентного усиления многоволнового смещения в растворах красителей при использовании дополнительных источников излучения, а также в условиях реализации режима генерации в самом образце, где и происходит запись динамических голограмм.

Данный метод является перспективным для реализации некогерентного усиления: так, если среда, где происходит формирование динамических голограмм, является генерирующей за счет стоксового сдвига излучения генерации, есть большая вероятность того, что это излучение будет поглощаться в канале возбуждения, так как синглетные возбужденные уровни являются сходящимися, обеспечивая некогерентное усиление.

Сингулярная динамическая голография

С 2005 г. на кафедре под руководством А. Л. Толстика начало развиваться новое научное направление, связанное с использованием сингулярных пучков для голографической записи. В этих исследованиях активное участие принимали О. Г. Романов и Д. В. Горбач, а также студенты, а потом сотрудники А. А. и Л. А. Казаки, которые сделали первые оптические транспаранты для генерации сингулярных пучков (оптических вихрей).

Устойчивый интерес, проявляемый в последние десятилетия к голографическим методам формирования пространственно модулиро-

ванных световых структур (вращающимся, спиральным, турбулентным, бесселевым пучкам, вихревым солитонам с винтовой фазовой дислокацией, прямоугольным и гексагональным решеткам оптических вихрей и т. д.), объясняется перспективами их применения при обработке и передаче оптической информации и формировании заданных пространственных структур световых полей.

Особенностью сингулярных пучков является наличие на волновом фронте особых точек — винтовых дислокаций, в которых интенсивность обращается в ноль, а фаза не определена. При обходе вокруг винтовой дислокации по сечению пучка фаза изменяется на величину $2\pi l$ (l — величина, называемая топологическим зарядом). В зависимости от знака l винтовые дислокации разделяются на положительные (правые) и отрицательные (левые). Появление такого рода особенности приводит к изменению формы волнового фронта. Эквивалентная поверхность перестает быть многолистной и становится единой, со специфической винтовой структурой. При этом направление распространения световой энергии задается вектором Умова — Пойнтинга, перпендикулярным к поверхности волнового фронта в каждой точке. Таким образом, в окрестности винтовой дислокации будет происходить «завихрение» энергетического потока.

Сингулярные световые пучки обладают свойством сохранять свой топологический заряд при распространении, при этом дифракционная расходимость изменяет только поперечный размер пучка, сохраняя нулевую интенсивность в центре винтовой дислокации. Указанные свойства позволили использовать сингулярные пучки для захвата и манипуляции микрообъектами, оптической передачи информации, создания волноводных структур, анализа фазово неоднородных сред с высокой степенью хаотизации, включая турбулентные явления в атмосфере.

На первом этапе были проанализированы методы формирования непрерывных и импульсных лазерных пучков с фазовой сингулярностью и закономерности записи сингулярных динамических голограмм в резонансных средах. Пучки с винтовой фазовой дислокацией (оптические вихревые пучки) были получены с помощью компьютерно-синтезированных дифракционных структур. Для непрерывного лазерного излучения малой интенсивности применялись традиционные стационарные амплитудные транспаранты, которые оказались непригодными для лазерных импульсов большой мощности. Для формирования лазерных импульсов с фазовой сингулярностью был предложен оригинальный

метод с использованием фазовых дифракционных структур, создаваемых в поглощающих растворах красителей в желатине, а через несколько лет совместно с профессором В. В. Могильным (кафедра физической оптики) были изготовлены дифракционные элементы на основе фотополимеров, обладающих высокой лучевой стойкостью. Переход к лазерным импульсам (оптическим вихрям) наносекундной длительности позволил осуществить запись сингулярных динамических голограмм в растворах красителей по схеме встречного четырехволнового смешения. Установлено, что фазовая сингулярность, вносимая в сигнальный пучок при записи динамической голограммы, переносится в дифрагированный пучок в условиях встречного четырехволнового смешения, обеспечивая полное пространственно-фазовое сопряжение.

В теоретические исследования в данном направлении активно включился доцент О. Г. Романов, который проанализировал особенности преобразования пространственной структуры сингулярных световых пучков в процессе их распространения и взаимодействия в резонансных средах. Исследованы влияния явлений нелинейного поглощения, самофокусировки и дефокусировки на характеристики оптических вихрей различной топологической структуры и определены условия самофокусировки и дефокусировки сингулярных световых пучков в резонансных средах. Показано, что самомодуляция световых пучков вследствие эффектов нелинейного изменения коэффициента поглощения и показателя преломления резонансной среды может приводить к формированию самолокализованных пространственных структур в виде темных солитонов.

Большой объем работ был выполнен по анализу закономерностей преобразования сингулярных световых пучков при записи динамических голограмм и реализации многоволновых взаимодействий в средах с резонансной нелинейностью. Исследовано влияние эффектов фазовой кросс-модуляции и пространственно-неоднородного энергообмена между световыми пучками на энергетическую эффективность и качество преобразования волнового фронта оптических вихрей при восстановлении изображений в различных порядках дифракции. Показано, что схемы многоволнового смешения на амплитудных и фазовых динамических решетках могут быть использованы для осуществления различных операций преобразования волнового фронта оптических вихрей, включая инвертирование знака топологического заряда и его мультиплицирование при восстановлении изображений в различных порядках дифракции.

Экспериментальные исследования многоволновых взаимодействий сингулярных световых пучков выполнил доцент **Дмитрий Владиславович Горбач**. С использованием схем вырожденного и невырожденного по частоте четырех- и шестиволнового смешения впервые экспериментально зафиксирован эффект мультиплицирования топологического заряда, а также преобразования сингулярного светового пучка из ИК-области спектра в видимую область, продемонстрирована инверсия знака топологического заряда светового пучка при четырех- и шестиволновом взаимодействии. Результаты исследований нашли отражение в его кандидатской диссертации «Фазово-поляризационное преобразование и волноводное распространение гауссовых и сингулярных световых пучков при их взаимодействии в резонансных средах» (научный руководитель — А. Л. Толстик). В работе были проанализированы голографические методы управления топологическим зарядом оптических вихрей на основе сингулярных динамических голограмм. Экспериментально продемонстрирована инверсия знака топологического заряда сингулярного светового пучка, а также реализация кратного увеличения величины топологического заряда при вырожденных по частоте многоволновых взаимодействиях в растворе красителя родамин-6Ж. С использованием схемы невырожденного четырехволнового взаимодействия при записи пропускающих динамических голограмм в схеме попутного распространения опорного светового пучка и сигнального сингулярного пучка в этанольном растворе ПК 3274U реализовано частотное преобразование оптических вихрей из ИК-области спектра в видимую. При использовании схемы шестиволнового взаимодействия осуществлено удвоение топологического заряда с одновременным частотным преобразованием.

Экспериментально проанализирована поляризационная запись сингулярных динамических голограмм, установлены зависимости ориентации плоскости поляризации дифрагированного сингулярного пучка от поляризации взаимодействующих волн при вырожденных многоволновых взаимодействиях. Показано, что при любой комбинации поляризаций взаимодействующих волн величина внесенного в сформированную динамическую голограмму топологического заряда, передаваемого дифрагированной волне, остается постоянной.

Оригинальные результаты получены при анализе взаимодействия гауссового и сингулярного световых пучков. Продemonстрирована возможность полного внутреннего отражения пробного пучка от области

светоиндуцированного изменения показателя преломления, созданной пучком накачки. На этой основе определены условия, при которых имеет место режим волноводного распространения пробного светового пучка в светоиндуцированной области, созданной мощным сингулярным пучком. Экспериментально продемонстрирована локализация интенсивности пробного пучка вдоль оси сформированного волновода при коллинеарном распространении пучков в этанольном растворе красителя родамин-6Ж.

Дальнейшее развитие исследований в области сингулярной и поляризационной оптики нашло отражение в кандидатской диссертации **Сергея Александровича Назарова** «Преобразование поляризационно-фазовой структуры лазерных пучков элементами на основе жидких кристаллов, твердых и жидких растворов красителей» (2019). Целями работы были определение условий преобразования поляризационной, фазовой и пространственной структуры лазерных пучков голографическими и ЖК-элементами, установление закономерностей формирования световых полей с заданной фазово-поляризационной структурой и создание на их основе объемных голографических элементов для применения в микроскопии. Экспериментально реализована поляризационная запись динамических голограмм в условиях, когда записывающие голограмму волны ортогонально поляризованы. Была установлена зависимость ориентации плоскости поляризации дифрагированной волны от взаимной ориентации плоскостей поляризаций всех взаимодействующих волн. При анализе поляризационной записи динамических голограмм в растворе красителя акцент делался на запись поляризационных решеток волнами с ортогональными круговыми поляризациями. С использованием схемы четырехволнового взаимодействия в растворе красителя родамин-6Ж экспериментально установлена зависимость состояния поляризации дифрагированного лазерного излучения для набора основных комбинаций поляризаций, записывающих и считывающих динамическую голограмму волн. Показано, что при считывании поляризационной динамической голограммы волной с линейной или круговой как у опорной волны поляризацией образуется дифрагированная волна с круговой поляризацией, отвечающей сигнальной волне. Если сигнальная волна имеет круговую поляризацию, а опорная — линейную, то голограмма формируется за счет как пространственной модуляции интенсивности, так и поляризации суммарного светового поля. При считывании дан-

ной голограммы волной с линейной поляризацией дифрагированная волна будет иметь эллиптическую поляризацию, вытянутую вдоль направления поляризации считывающей волны. Дифракция волны с круговой поляризацией на голограмме, записанной волнами с ортогональными линейными поляризациями, приводит к появлению волны с круговой поляризацией, ортогональной считывающей волне.

Было также проанализировано прохождение непрерывного и импульсного лазерного излучения в виде бесселева светового пучка нулевого и первого порядка в растворе красителя родамин-6Ж и ЖК. Показано, что при распространении бесселева пучка в растворе красителя в поперечном профиле лазерного излучения появляются дополнительные кольцевые структуры, обусловленные эффектом самодифракции. Изменение пространственного распределения интенсивности зависит от концентрации раствора красителя и интенсивности лазерного излучения. Определены концентрации раствора красителя и энергии пико- и наносекундных лазерных импульсов, при которых имеет место самодифракция бесселева светового пучка нулевого и первого порядка.

Особый интерес вызывает реализация спин-орбитального взаимодействия. Такие понятия в оптике связывают с фазовой сингулярностью (орбитальный угловой момент) и поляризацией света (спиновый угловой момент). При распространении светового пучка в однородной изотропной среде эти два момента сохраняются и не зависят друг от друга. Спиновый и орбитальный угловые моменты оказываются связанными в неоднородных или анизотропных средах. Их изменения могут иметь место при взаимодействии световых пучков в нелинейных средах. Новизна исследований состояла в реализации спин-орбитального взаимодействия в тонких слоях ЖК, обладающего высокой, электрически управляемой анизотропией. Экспериментально установлены закономерности преобразования поляризационной, пространственной и фазовой структуры бесселева светового пучка при его распространении в электрически управляемой ЖК-ячейке. Определены условия, при которых линейно поляризованный бесселев пучок нулевого порядка преобразуется в азимутально-модулированный пучок второго порядка с ортогональной линейной поляризацией. Показано, что в данном случае одновременно имеют место два типа спин-орбитальных преобразований, при которых равное количество фотонов, обладающих спиновым моментом $\sigma^{\pm} = \pm \hbar$ (на каждый фотон) преобразуются в такое же число фотонов, полный угловой момент которых включает

как спиновую, так и орбитальную $l^{\pm} = \pm 2\hbar$ части: $\sigma^{\mp} + l^{\pm} = \pm \hbar$ (на каждый фотон). Эти одновременно происходящие процессы проявляются в возникновении в дальнем поле за ячейкой четырехлепесткового поля бесселева типа. Сформированным с помощью ЖК-ячейки многолучевым аксиально симметричным световым полем можно управлять путем изменения поляризации падающего бесселева пучка и величины прикладываемого электрического напряжения, что может быть использовано для захвата и управления микрочастицами. Основными преимуществами использования ЖК-ячеек для формирования описанных полей являются малая толщина ЖК-слоя (~ 20 мкм) и возможность электрического переключения.

В целях применения разработанных методик в оптической микроскопии были рассчитаны основные характеристики и определены условия записи объемных мультиплексных голограмм в тонких слоях (толщина 100 — 200 мкм) полиметилметакрилата с высокой концентрацией ($\sim 2 - 3$ мол. %) фенантренхинона. На основе записанных голограмм созданы голографические элементы для 3D-микроскопии. Продемонстрировано, что полученные голографические элементы позволяют реализовывать селективное возбуждение отдельных областей и одновременное получение изображения нескольких срезов исследуемого образца.

Повышенный интерес, проявляемый к сингулярным световым пучкам (оптическим вихрям), определяется их использованием в системах передачи и обработки информации. Так, сочетание поляризации излучения и топологического заряда в качестве информационных параметров позволяет объединить возможности поляризационной голографии и сингулярной оптики и на новых принципах осуществлять кодирование информации. Использование таких характеристик дифрагированного излучения в качестве нетривиальных информационных параметров перспективно для формирования скрытых изображений, которые одновременно могут совмещать технологию голографической защиты с записью кодированной информации.

Динамическая голография и бесконтактная диагностика функциональных материалов

Одним из перспективных применений динамической голографии является бесконтактная диагностика материалов. Под руководством профессора А. Л. Толстика совместно с доктором наук Е. В. Ивакиным

и И. Г. Даденковым выполняются исследования по записи тонких и объемных динамических голограмм в различных средах, используемых в современных лазерных и оптических технологиях. Существенным достоинством метода динамических решеток (метод пространственно-модуляционной спектроскопии) является бесконтактная диагностика материалов, характеризующихся разнообразными механизмами отклика на оптическое возбуждение. Метод основан на импульсной записи динамической решетки в исследуемом материале. Для получения информации о фотоиндуцированных процессах одновременно реализуют этап считывания динамической решетки с использованием непрерывного лазерного излучения или отдельными импульсами с временной задержкой. Таким образом получают диффрактированный сигнал, который позволяет отследить кинетику релаксации записанной решетки.

Существенным преимуществом метода являются широкие возможности вариации периода динамической решетки, длины волны записывающего и считывающего лазерного излучения. Максимальное значение дифракционной эффективности динамической решетки позволяет рассчитать светоиндуцированное изменение показателя преломления и нелинейные оптические восприимчивости различных порядков. Регулируемый период динамической решетки и четко выраженное направление ее вектора позволяют отличать транспортные процессы в исследуемом материале от фотоиндуцированных эффектов локального характера, а также находить и исследовать в образцах признаки анизотропии. С помощью анализа зависимости дифракционной эффективности от времени можно определить продолжительность жизни динамической решетки и рассчитать разнообразные параметры материалов, включая коэффициент температуропроводности, время жизни свободных носителей заряда в полупроводниках и ловушечных уровней в фоторефрактивных кристаллах, а также возбужденного состояния активаторов лазерных сред и т. д.

Одно из активно разрабатываемых направлений относится к записи динамических голограмм в полупроводниковых материалах. Запись в них динамических решеток обусловлена проявлением различных механизмов нелинейности, связанных с переходом электронов в зону проводимости и последующим заселением ловушечных уровней, нагревом среды и деформацией поверхности. При этом возможно одновременное формирование различных типов динами-

ческих решеток. В зависимости от коэффициента поглощения формируется объемная или тонкая решетка. Изменение показателя преломления приводит к формированию фазовой решетки, а при изменении коэффициента поглощения записывается амплитудная решетка. Деформация поверхности приводит к формированию рельефной решетки.

Запись объемных динамических решеток в кристаллах семейства силленитов

Фоторефрактивные кристаллы семейства силленитов (силикат и титанат висмута) относятся к широкозонным полупроводникам, при этом существенное влияние на оптические свойства оказывают примеси и дефекты кристаллической решетки, приводящие к возникновению в запрещенной зоне донорных и акцепторных ловушек. Как показали экспериментальные исследования, продолжительность жизни ловушечных уровней в зависимости от глубины залегания может меняться от микро- и миллисекунд до секунд и даже часов. Благодаря ловушечным уровням появляется возможность работы с излучением в длинноволновой области спектра. Диффузия электронов в зоне проводимости приводит к формированию поля пространственного заряда и модуляции показателя преломления вследствие эффекта Поккельса. При этом формирование динамических решеток происходит в режиме реального времени, что является одним из существенных преимуществ фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов (силикат и титанат висмута). Возможность постоянной перезаписи динамических решеток определила использование кристаллов силиката и титаната висмута в адаптивных интерферометрах, голографических системах записи и обработки информации.

В качестве записывающего излучения использовалась вторая гармоника неодимового лазера с длиной волны 532 нм и длительностью импульсов 10 нс. В схеме экспериментальной установки была предусмотрена возможность изменения периода интерференционной картины, которая формировала динамическую решетку в фоторефрактивном кристалле. В качестве зондирующего излучения использовалось излучение непрерывного гелий-неонового лазера. Дифрагированный пучок направлялся на фотоприемник и регистрировался с помощью цифрового осциллографа (рис. 1).

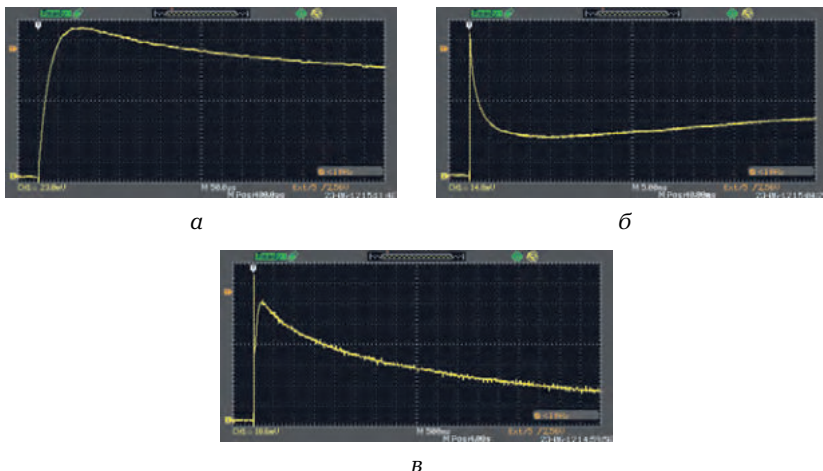


Рис. 1. Осциллограммы дифрагированного сигнала на динамической решетке с периодом 400 нм в кристалле силиката висмута при интенсивности лазерного излучения 1 МВт/см^2 с временными разрешениями: а — 50 мкс; б — 5 мс; в — 500 мс

Видно, что дифрагированный сигнал состоит из двух компонент, одна из которых быстрая, формируется за сотню микросекунд (рис. 1, а) и релаксирует несколько миллисекунд (рис. 1, б). Затем за пару сотен миллисекунд формируется долгоживущая решетка, которая живет несколько секунд (рис. 1, в). Формирование двух типов решеток можно связать с различными ловушечными уровнями (вблизи зоны проводимости и в глубине запрещенной зоны). Показано, что время формирования и релаксации короткоживущих решеток слабо зависят от их периода, но существенно возрастает с увеличением интенсивности лазерного излучения, записывающего динамическую решетку. Однако время релаксации долгоживущей решетки практически не зависит от интенсивности, но существенно зависит от периода динамической решетки. Выявленные закономерности можно объяснить локальным механизмом формирования короткоживущих решеток и пространственной нелокальностью нелинейного изменения показателя преломления при работе с долгоживущими решетками.

Ранее исследования фоторефрактивных кристаллов проводились совместно с Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (профессор С. М. Шандаров) и Йенским уни-

верситетом им. Ф. Шиллера (профессор Р. Коваршик). Акцент делался на экспериментальные исследования динамики развития и релаксации фотоиндуцированного поглощения в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ в видимой и ближней ИК-области спектра при облучении кристаллов пикосекундным, наносекундным и непрерывным излучением с $\lambda = 532$ нм. Установлена зависимость величины фотохромного эффекта в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов от интенсивности лазерного излучения при сохранении дозы облучения. Обнаружено существование пороговой интенсивности, зависящей от длительности лазерного импульса, при превышении которой эффект оптического затемнения фоторефрактивных кристаллов доминирует над эффектом фотохромной релаксации. Показано, что, используя излучение различной интенсивности и на разных длинах волн, можно управлять скоростью процесса затемнения или просветления кристалла. Для объяснения установленных закономерностей предложена феноменологическая модель, основанная на использовании эффектов каскадного либо двухфотонного поглощения. По результатам этих исследований в 2013 г. была защищена кандидатская диссертация аспирантом из Ирака Хануном Хайдером Камелом «Фотохромные эффекты в фоторефрактивных кристаллах титаната висмута» (научный руководитель — А. Л. Толстик).

Запись тонких динамических решеток в германии и кремнии

Германий и кремний являются наиболее популярными полупроводниковыми материалами и широко используются в промышленности. Сотрудники кафедры провели апробацию метода динамических решеток для бесконтактной диагностики этих популярных полупроводниковых материалов.

Запись динамических решеток осуществлялась лазерным излучением на длине волны 532 нм с длительностью импульса 20 нс. Для считывания использовалось излучение полупроводникового лазера с длиной волны 635 нм. На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы дифрагированных сигналов, полученные при записи поверхностных динамических решеток в образцах монокристаллического германия и пленки оксида кремния. Особенностью записи решеток в таких материалах является одновременное проявление различных механизмов нелинейности. Для выделения последних используется дифракция на дополнительной решетке, так называемом гомодине. При этом генерируется дополнительный световой пучок, коллинеарный и когерентный пучку, дифрагированному на динамической решетке.

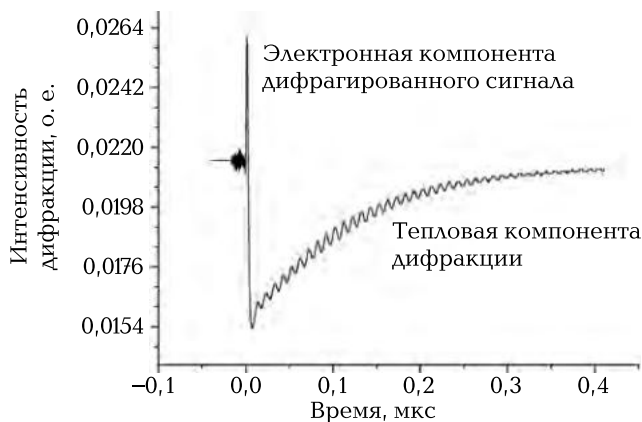


Рис. 2. Сигнал дифракции на решетке монокристаллического германия (период решетки — 5 мкм)

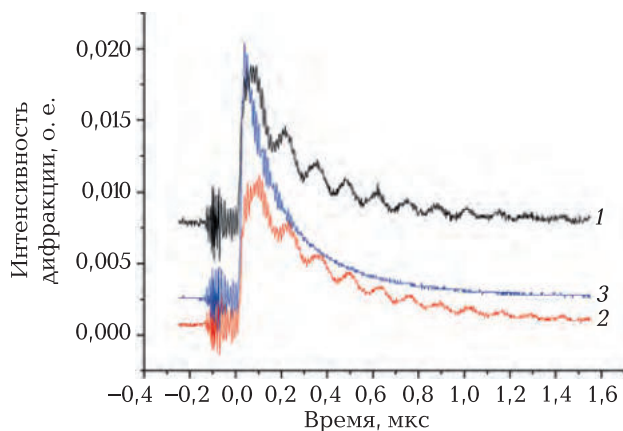


Рис. 3. Сигнал дифракции на решетке без оксидной пленки SiO_2 (1) и с пленкой толщиной 0,5 мкм (2) и 0,9 мкм (3) (период решетки — 12,5 мкм)

Рассмотрим эффект гомодина на примере экспоненциально затухающего сигнала $E_D(t) = E_D(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ и постоянного поля гомодина $E_B(t) = E_B$. В результате интерференции дифрагированных сигналов с дифракционной решеткой и гомодина суммарная интенсивность записывается в виде

$$I_D(t) = I_B + I_D(0) \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right) + 2\sqrt{I_B I_D(0)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cos \Delta\varphi,$$

где I_D — интенсивность дифракции; I_B — интенсивность поля гомодина; τ — время жизни динамической решетки; $\Delta\varphi$ — разность фаз между дифрагированным полем на исследуемой динамической решетке и гомодине.

Из выражения видно, что суммарный сигнал представляет сумму двух сигналов с временами релаксации $\tau/2$ и τ , при этом их вклады зависят от $\Delta\varphi$. Этой разностью фаз можно управлять, меняя пространственное положение гомодина относительно записываемой динамической решетки. Для выделения искомой компоненты дифрагированного сигнала необходимо зарегистрировать кинетики при разности фаз $\Delta\varphi$, равной 0 и π :

$$I_{D1}(t) = I_B + I_D(0) \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right) + 2\sqrt{I_B I_D(0)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

$$I_{D2}(t) = I_B + I_D(0) \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right) - 2\sqrt{I_B I_D(0)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Разностный сигнал $I_{D1}(t) - I_{D2}(t) = 4\sqrt{I_B I_D(0)} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ позволяет выделить искомую компоненту с временем релаксации τ .

Как видно, использование когерентного поля гомодина позволило разделить электронную и тепловую компоненты, связанные с положительным изменением показателя преломления при переходе электронов в зону проводимости и отрицательным тепловым изменением показателя преломления. Длительность электронной компоненты определяется временем рекомбинации свободных носителей заряда, лежит в диапазоне менее 1 нс. В свою очередь кинетики тепловой компоненты дифракции, представленные на рис. 2 и 3, позволяют определить температуропроводность материала. Так, например, температуропроводность монокристаллического германия составила $0,34 \text{ см}^2/\text{с}$, что соответствует его табличному значению теплопроводности при комнатной температуре 58 Вт/мК .

На рис. 2 и 3 присутствуют также акустические компоненты дифракции на частоте $5 - 20 \text{ МГц}$ в зависимости от периода динамической решетки. Их формирование обусловлено тепловым возбуждением приповерхностного слоя воздуха, контактирующего с нагретой поверхностью образцов.

Представленные результаты по оксиду кремния с оксидной пленкой и без демонстрируют возможности метода для оценки толщины пленки по амплитуде осциллирующей компоненты. Видно, что амплитуда акустической составляющей в воздухе убывает с ростом толщины пленки. Это связано с тем, что с увеличением времени распространения тепла от поверхности кремния, участвующей в поглощении, до внешней поверхности пленки, граничащей с воздухом, контраст решетки уменьшается вследствие смещения звуковой волны и теплопереноса вдоль поверхности образца.

Возможность измерения частоты ультразвуковой волны с использованием метода динамических решеток позволяет оценить скорость звука в приповерхностном слое воздуха. Эта идея апробирована на примере пленки телурида свинца PbTe:Bi (рис. 4). Учитывая, что скорость распространения ультразвука в воздухе растет с температурой в диапазоне до 500 К, предложенный метод может быть использован для определения температуры пленки в момент записи динамической решетки.

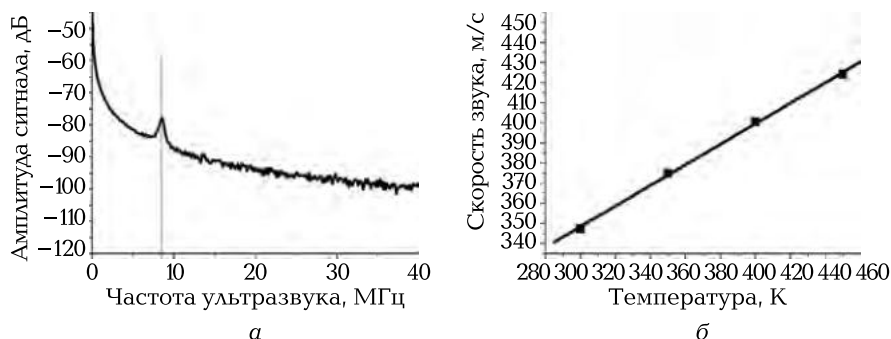


Рис. 4. Исследования с пленкой PbTe:Bi :

- а* — Фурье-спектр кинетики дифрагированного излучения (вертикальной линией отмечена частота акустической монохроматы, равная 8,32 МГц);
- б* — температурная зависимость скорости ультразвука в воздухе

По частоте осцилляций, найденной с помощью быстрого преобразования Фурье сигнала дифракции, и пространственному периоду динамической решетки, определена скорость распространения ультразвука (350 м/с). Используя график температурной зависимости скорости ультразвука в воздухе находим, что температура пленки при такой скорости ультразвука составляет 310 К.

Таким образом, представленные в этом разделе результаты демонстрируют широкие возможности использования метода динамических решеток для неразрушающей диагностики материалов, выделения различных механизмов нелинейности и измерения термооптических и кинетических характеристик. Так, используя импульсную запись объемных решеток в фоторефрактивных кристаллах, определены условия записи решеток с временами жизни, отличающимися на четыре порядка (сотни микросекунд и секунды). При записи поверхностных динамических решеток в образцах монокристаллического германия выделены компоненты дифрагированного сигнала, обусловленные электронной и тепловой нелинейностями. При этом показано, что тепловая компонента дополнительно промодулирована акустической компонентой, связанной со звуковой волной, распространяющейся в воздухе у поверхности пленки.

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ И ФОРМИРОВАНИЯ ЗАДАННЫХ СТРУКТУР СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

Исследования ЖК проводились на кафедре еще в 1960-х гг. при непосредственном участии Л. В. Володько. В 1971 г. после создания НИИ ПФП эти исследования были переведены в лабораторию оптики конденсированных сред института под научное руководство профессора Л. В. Володько, впоследствии его ученика А. А. Минько. Главной задачей исследований было установление связи между физико-химическими характеристиками ЖК и строением их молекул. Интересная работа под руководством А. В. Чалея была выполнена в начале 1980-х гг. на кафедре спектроскопии и квантовой электроники по использованию холестерических ЖК для регистрации интерференционного поля излучения CO_2 лазера, работающего на длине волны 10,6 мкм. Под действием ИК-излучения в результате нагрева пленка холестерического ЖК меняла свой цвет. Разработанная методика позволяла фиксировать распределение интенсивности излучения в дальней ИК-области спектра и была предложена для регистрации интерферограмм активной области термоядерных реакторов с лазерным возбуждением. В этих работах принимали участие выпускники

кафедры Е. Л. Петровский, И. В. Сташкевич, А. Л. Толстик, пришедшие в созданную в 1980 г. НИЛ когерентной оптики.

В 1980-х гг. на кафедре также активно проводили исследования процесса записи рельефных фазовых голограмм на длине волны 10,6 мкм на пленках поливинилового спирта (ПВС). Голографические методы позволяли формировать рельеф на поверхности пленок ПВС с заданным периодом и глубиной до 3 мкм. Эти исследования проводились совместно с лабораторией оптической голографии Института физики АН БССР, руководимой А. С. Рубановым. Он предложил исследовать структуру, состоящую из рельефной решетки ПВС в контакте с ЖК. Такая комбинация, благодаря уникальным возможностям ЖК переориентироваться под действием низких управляющих напряжений, открывала перспективу создания электрически управляемых дифракционных элементов. По этой тематике на кафедре работали младший научный сотрудник И. В. Сташкевич и дипломница Е. А. Мельникова, которая проводила теоретические исследования спектральных характеристик системы «рельефная решетка — жидкий кристалл». В ходе выполнения работ были созданы экспериментальные образцы данных управляемых систем. Система «рельефная решетка — жидкий кристалл» в 1987 г. была отмечена бронзовой медалью ВДНХ СССР. Разработанная технология создания тонкопленочных ЖК-элементов была усовершенствована в 1990-х гг. Были изготовлены электрически управляемые ЖК-элементы с закрученным директором ЖК (твист-структура), которые в сочетании с анализатором позволяли управлять световыми пучками.

Активизация исследований на кафедре по ЖК-тематике в начале 2000 г. связана с переходом к созданию пространственно модулированных фазово-поляризационных структур, использующих уникальные свойства ЖК, определяемые аномально высокой величиной двулучепреломления и возможностью управления ею под действием низких рабочих напряжений ($\sim 1 - 10$ В) при малой потребляемой мощности. В диссертации Е. А. Мельниковой «Бистабильность и автоколебания в нематических жидкокристаллических системах с оптоэлектронной обратной связью», защищенной в 2001 г. (научные руководители А. В. Чалей и В. В. Беляев) были предложены новые методы управления амплитудно-временными характеристиками световых полей с использованием оптоэлектронных ЖК-элементов, позволяющих реализовать бистабильные устройства, перестраиваемые логи-

ческие элементы и автоколебательные системы, генерирующие световые импульсы с изменяемыми частотой и формой.

В результате проведенных диссертационных исследований было получено аналитическое выражение, определяющее ориентирующее действие периодической синусоидальной поверхности в оптоэлектронной системе «рельефная решетка — плоская подложка». Найдены приближенные аналитические соотношения, описывающие стационарное распределение директора по толщине плоскопараллельного слоя нематического ЖК под действием внешнего электрического поля. Теоретически исследована кинетика релаксации директора ЖК с учетом макроскопического момента инерции ЖК-слоя после выключения внешнего электрического поля. Разработаны новые оптические логические элементы на основе плоскопараллельных ЖК-ячеек и дифракционных ЖК-систем с оптоэлектронной обратной связью. Было доказано, что две ЖК-ячейки с оптоэлектронной обратной связью позволяют осуществить четыре логических операции, а три связанные ЖК-ячейки — восемь, включающих функционально полные наборы булевых операций (И, ИЛИ, НЕ; операцию Шеффера; операцию Пирса). Экспериментально и теоретически были исследованы динамические режимы работы систем на основе двух связанных ЖК-элементов, позволивших реализовать режимы затухающих и регулярных пульсаций интенсивности на выходе системы при постоянной интенсивности на входе.



В лаборатории Института аналитических исследований
им. Лейбница (Дортмунд, 2019)

Результаты проведенных исследований были использованы при выполнении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) «Разработка и изготовление многофункционального стенда для оптической обработки информации и создание на его базе комплекта работ лабораторного практикума» (2000 – 2002; научный руководитель – А. Л. Толстик) (рис. 5). Был разработан лекционный курс по оптической обработке информации и новые лабораторные работы: «Оптическая бистабильность», «Самопульсации интенсивности и оптический хаос», «Пространственная фильтрация изображений», «Оптические логические элементы». Основным функциональным узлом стенда являлась система «нематическая ЖК-ячейка – поляризатор» с оптоэлектронной обратной связью. Ячейка состояла из двух стеклянных пластин с напыленными прозрачными электродами, на подложки был нанесен тонкий слой ориентирующего покрытия, нематический кристалл закручен на четверть витка. Такая структура поворачивает вектор поляризации прошедшего через нее оптического излучения на 90° . Действие внешнего электрического поля приводит к исчезновению оптической активности. Таким образом, используя поляризаторы на выходе ЖК-ячейки, можно электрически управлять пропусканием ЖК-системы. Нелинейный характер зависимости пропускания от напряжения позволил реализовать бистабильный режим, режим

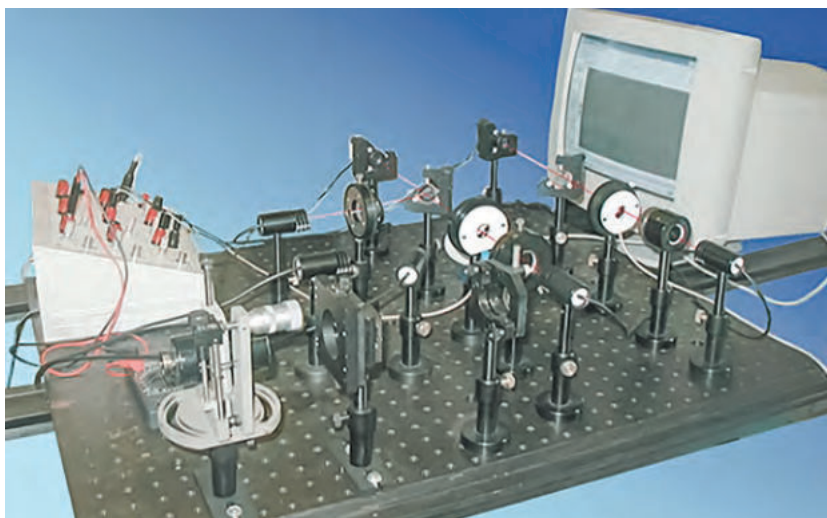


Рис. 5. Учебно-научный стенд по оптической обработке информации (2002)

самопульсаций интенсивности и выполнить ряд логических операций. Небольшое число управляющих параметров оптоэлектронных ЖК-элементов, отсутствие требований к высокой мощности лазерного излучения (можно использовать маломощные полупроводниковые лазеры), наглядность и простота регистрации и обработки данных эксперимента позволили использовать предлагаемые оптоэлектронные элементы как модельные системы обработки оптической информации, удобные для обучения студентов. Эти работы не потеряли свою актуальность и в настоящее время. Результаты были опубликованы в научных журналах, а предложенная схема использована в Дальнянском политехническом университете при постановке лабораторной работы «Оптическая бистабильность».

Существенный прогресс в разработке электрически управляемых ЖК-элементов связан с переходом от механического метода натирания ориентирующего покрытия (слой поливинилового спирта) к методу фотоориентации директора ЖК (рис. 6). На первом этапе для этого использовали фотополимеры, разработанные под руководством В. В. Могильного на кафедре физической оптики. Полимеры включали бензальдегидные фрагменты в качестве боковых групп и обладали фоточувствительными свойствами, демонстрируя, в частности, фотонаведенное двулучепреломление. Оптическая анизотропия наводится в объеме полимерного материала и на его поверхности и связана с образованием ориентированных сшивок между макромолекулами под действием поляризованного ультрафиолетового (УФ) излучения. В результате поверхность приобретает свойства ЖК-ориентанта. Формирование дифракционной структуры происходило при экспонировании светочувствительного полимера поляризованным УФ-излучением через фотолитографическую маску или при записи интерференционного поля двух лазерных пучков. На этом принципе в 2007 г. были созданы ЖК-фазовые решетки с эффективностью дифракции в первый порядок $\sim 30\%$, что близко к предельному значению для тонких фазовых голограмм с синусоидальным профилем.

В это же время на кафедре под руководством А. Л. Толстика начались работы в области сингулярной оптики. Были созданы оптические транспаранты, позволяющие формировать сингулярные пучки, и исследованы эффекты интерференции пучков с различными топологическими зарядами (рис. 7). Используя фоточувствительный полимер и специальную компьютерно-синтезированную фотолитографическую маску, представляющую собой картину интерференции плоской

волны и сингулярного светового пучка, были созданы электрически управляемые ЖК-элементы, формирующие сингулярные световые пучки. Было показано, что использование второго и более высоких порядков дифракции позволяет осуществлять мультиплицирование топологического заряда. При этом пучки, дифрагированные в $+N$ - и $-N$ -порядки дифракции, имеют противоположные знаки топологического заряда. Активное участие в этих работах принимали А. А. Казак (выпускник кафедры 2006 г.) и Л. А. Казак (выпускник 2011 г.).

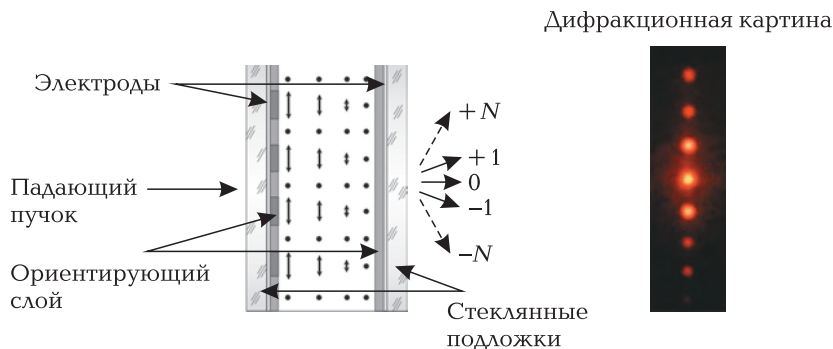


Рис. 6. Электрически управляемый дифракционный ЖК-элемент

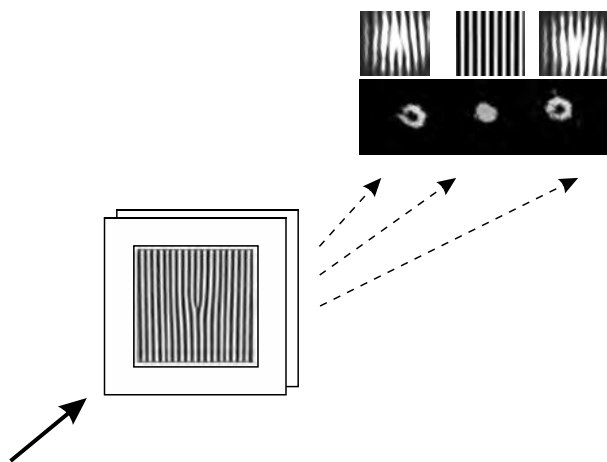


Рис. 7. Схема формирования сингулярных пучков и картины интерференции прошедшего и дифрагированных пучков с плоской волной

Наряду со стандартными схемами использования ЖК-ячеек, когда световой пучок ортогонально падает на ЖК-транспарант, было обращено внимание на возможность планарного распространения светового пучка в ЖК-слое между двумя ограничивающими слой стеклянными пластинами. Эти работы выполнялись Е. А. Мельниковой и ее аспирантами А. А. Комаром (выпускник кафедры 2007 г.), О. С. Кабановой (выпускница 2012 г.) и И. И. Рушновой (выпускница 2013 г.). Уже в 2010 г. были опубликованы результаты первых исследований, в которых проанализированы особенности распространения и отражения световых пучков на границе раздела двух областей нематического ЖК с ортогональной ориентацией директора. Экспериментально продемонстрирован эффект полного внутреннего отражения, а также возможность пространственного разделения ортогонально-поляризованных световых пучков на границе раздела двух мезофаз. Это направление исследований было развито в кандидатской диссертации И. И. Рушновой «Управление пространственно-поляризационными характеристиками световых пучков жидкокристаллическими элементами с электрически контролируемой рефрактивной границей» (2018). В работе был экспериментально реализован эффект полного внутреннего отражения линейно поляризованного лазерного излучения от электрически управляемой рефрактивной границы в ЖК-элементах с планарной ортогональной ориентацией директора, а также с планарной и гомеотропной ориентацией молекул в смежных областях. Осуществлено электрически управляемое пространственно-поляризационное разделение светового поля на границе раздела ортогональных направлений директора. На рис. 8 приведены фотографии световых пучков при их распространении в ЖК-ячейке с границей раздела двух доменов ЖК с ортогональными ориентациями директора. Видно, что в зависимости от выбранных начальных ориентаций директора имеет место преломление или отражение ортогонально-поляризованных световых пучков, причем характером распространения светового пучка можно управлять с помощью подаваемого электрического напряжения. В первом случае рефрактивная граница возникает при подаче напряжения и компонента $\mathbf{E} \parallel OZ$ и претерпевает отражение. Во втором случае граница существует изначально (отражение для компоненты $\mathbf{E} \parallel OX$) и исчезает при подаче напряжения.

Несомненный интерес представляет предложенная новая топология ориентации директора ЖК в двухдимерной электрически управляемой ЖК-ячейке, в которой граница двух планарных ортогональных ориентаций директора существует изначально и меняется на границе с планарной и гомеотропной ориентациями директора при подаче напряжения. В этом случае имеет место разделение и переключение направления распространения световых пучков с ортогональными состояниями поляризации. Данная схема ориентации директора обеспечивает реализацию полного внутреннего отражения горизонтально поляризованной волны (красный луч), а при подаче на ЖК-элемент напряжения — полное внутреннее отражение вертикально поляризованной волны (зеленый луч) (рис. 9).

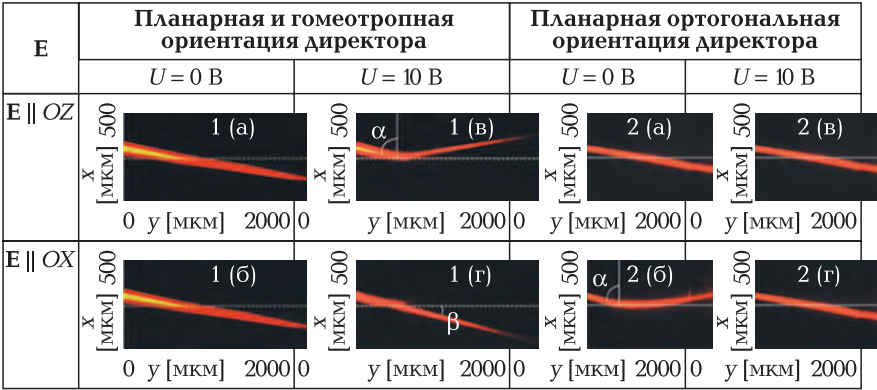


Рис. 8. Распространение световых пучков в электрически управляемых ЖК-ячейках

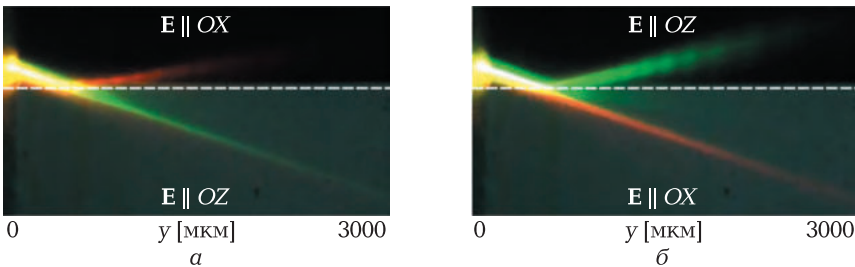


Рис. 9. Фотографии распространения излучения He-Ne и Nd:YAG (вторая гармоника) лазеров в электрически управляемом ЖК-элементе без напряжения (а) и при подаче напряжения (б)

Новые результаты получены при анализе особенностей отражения светового пучка от рефрактивной границы при изменении электрического поля. Установлено, что за счет смещения границы под действием электрического поля реализуется микросмещение светового пучка. Доказано, что в ЖК-ячейке с толщиной слоя 20 мкм коэффициент пропорциональности между пространственным сдвигом светового пучка и амплитудой напряжения составляет 6 мкм/В. Подобный эффект также реализован при отражении светового пучка от дугообразной границы раздела ортогональных ориентаций директора. В электрически управляемом ЖК-элементе с токопроводящим слоем в форме дуги радиусом кривизны $R = 3$ см под действием электрического поля реализовано управляемое угловое отклонение отраженной световой волны на $1,5^\circ$ при изменении амплитуды напряжения на 20 В.

Второе направление исследований связано с созданием волноводных структур в ЖК-слое (диссертационная работа О. С. Кабановой «Распространение световых пучков в волноводных электрически управляемых нематических жидкокристаллических структурах» (научный руководитель — Е. А. Мельникова)). Были созданы оригинальные многодоменные планарные топологии ориентации директора в электрически управляемой ЖК-ячейке, обеспечивающие контролируемый режим волноводного распространения линейно-поляризованного лазерного излучения. Экспериментально реализован режим волноводного распространения линейно-поляризованного лазерного излучения в ЖК-структурах с пространственной модуляцией ориентации директора и показано, что электрооптический отклик ЖК позволяет осуществить плавное управление волноводными параметрами разработанных ЖК-структур посредством изменения внешнего электрического поля. Созданы электрически управляемые волноводные ЖК-элементы для интегрально-оптических схем, позволяющие осуществлять передачу оптических сигналов по канальным волноводам, разветвителю и сумматору. На рис. 10 представлены фотографии световых пучков в ЖК-элементе при подаче на вход сумматора двух сигналов от гелий-неонового лазера (красный луч) и лазера на иттрий-алюминиевом гранате (вторая гармоника — зеленый луч). Видно, что в трехканальном разветвителе по крайним каналам сохраняются исходные сигналы, а по центральному волноводу идет суммирование двух сигналов и воспринимаемый глазом цвет становится желтым.

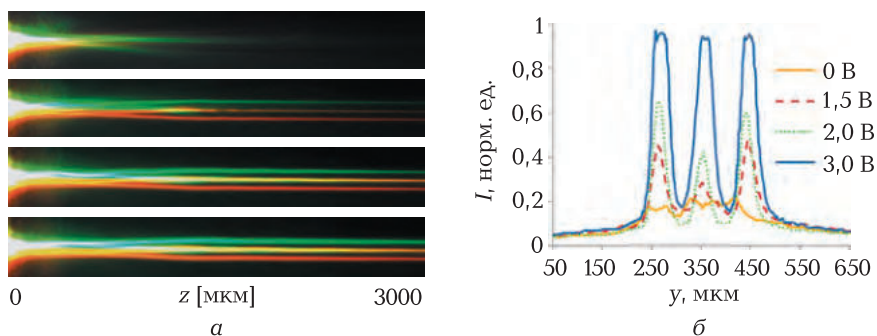


Рис. 10. Распространение световых пучков в волноводном ЖК-сумматоре (а) и профили распределения интенсивности $I(y)$ световых полей для $z = 2,0$ мм (б) при разных напряжениях U

Наряду с исследованиями распространения световых пучков в планарных ЖК-элементах были проанализированы условия возбуждения пространственных оптических солитонов (нематиконов). Пороговый уровень интенсивности в перетяжке светового пучка, приводящий к формированию светоиндуцированного волноводного ЖК-канала, составил $I_{\text{пор}} = 250 \text{ Вт/см}^2$ при оптимальном значении внешнего управляющего напряжения $U = 1,1 \text{ В}$ на электродах ЖК-ячейки. Показано, при распространении нематикона в системе связанных оптических ЖК-волноводов с электрически управляемой глубиной модуляции показателя преломления имеет место формирование сложной многомодовой структуры излучения, что позволяет осуществлять управление лазерным излучением видимой области спектра как в линейном, так и нелинейном режимах. Установлено также, что при распространении пространственного оптического солитона (нематикона) в системе ЖК-волноводов в условиях совместного проявления электрооптического и нелинейно-оптического отклика ЖК реализуется режим оптического разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых каналов.

Работы в области разработки и создания электрически управляемых ЖК-элементов были развиты в процессе подготовки докторской диссертации Е. А. Мельниковой «Фазово-поляризационные преобразования световых полей микроструктурированными жидкокристаллическими элементами», защищенной в 2023 г. (научный консультант — А. Л. Толстик). В диссертации были предложены новые методы

фазово-поляризационного преобразования световых полей на основе электрически управляемых ЖК-элементов (дифракционные и волноводные структуры, q -пластинки), позволяющего реализовать функции оптических ограничителей, поляризационных делителей, мультиплексоров и микросканеров, а также создавать световые пучки с заданными фазовыми и поляризационными характеристиками. Были построены теоретические модели дифракционных и волноводных структур, q -пластинок и созданы ЖК-элементы, осуществляющие фазовые и поляризационные преобразования лазерных пучков. Предложенная теоретическая модель дифракционной ЖК-структуры показала, что при отсутствии управляющего напряжения симметричную дифракционную ЖК-структуру можно рассматривать в виде двух тонких поляризационно-независимых амплитудных решеток с прямоугольным профилем штриха и суммарной дифракционной эффективностью $\sim 20\%$. При подаче электрического напряжения (порядка несколько сотен милливольт на микрон) имеет место срыв режима Могена, и дифракционная структура трансформируется в тонкую фазовую дифракционную решетку с дифракционной эффективностью, близкой к ее предельному значению.

При анализе условий формирования волноводных структур было определено пороговое значение светоиндуцированного перехода Фредерикса (10 кВт/см^2), выше которого линейно-поляризованное лазерное излучение самоканализируется и распространяется в режиме устойчивого нематикона. Продemonстрирована возможность чисто оптического управления пространственным распространением оптического излучения за счет взаимодействия двух солитонов, возбуждаемых в планарном ЖК-слое. Показано, что в зависимости от мощности светового пучка и величины управляющего напряжения в системе связанных ЖК-волноводов реализуется переключение между солитонным режимом и режимом дискретной дифракции светового пучка, что позволяет реализовать функции оптического разветвителя с электрически управляемым количеством включаемых каналов.

Наряду с вопросами по управлению и преобразованию световых пучков дифракционными и волноводными элементами в диссертации рассмотрены электрически управляемые оптические элементы для формирования сингулярных световых пучков. На основе предложенной технологии твист-планарной доменной ориентации директора ЖК созданы электрически управляемые топологические дифрак-

ционные элементы для формирования фазовых сингулярных пучков в широком спектральном диапазоне без дополнительной подстройки электрического напряжения. На рис. 11 демонстрируется возможность возбуждения световых пучков с фазовой сингулярностью при дифракции излучения лазера с параметрическим преобразователем частоты в видимой и ближней ИК-области спектра при фиксированном электрическом напряжении.

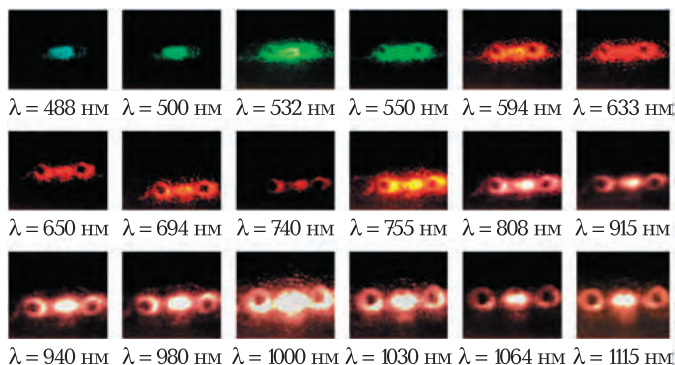


Рис. 11. Распределение интенсивности в нулевом и первых порядках дифракции на разработанном ЖК-элементе для различных длин волн лазерного излучения

Видно, что разработанный дифракционный элемент с чередующейся твист- и планарной ориентациями директора преобразует гауссовый световой пучок в оптический вихрь в спектральном диапазоне от 488 нм до 1115 нм. Сингулярные пучки распространяются в направлении первых порядков дифракции. При этом было показано, что используемая начальная твист-планарная ориентация директора позволяет получить дифракционную эффективность порядка 20 %, которая увеличивается при подаче напряжения, стремясь к максимальному значению 30 % при значении внешнего управляющего напряжения $U = 3$ В.

Новое перспективное направление исследований связано с созданием так называемых жидкокристаллических q -пластинок, которые позволяют создавать сингулярные пучки со сложной фазовой и поляризационной структурой. Разработана методика создания q -пластинок с фазовым ядром на основе метода фотоориентации азокрасителя AtA-2 излучением светодиода (440 – 460 нм) с использованием про-

странственной диафрагмы в форме клина. Фазовое ядро представляет собой центральную область элемента q -пластинки, где ориентация директора ЖК определена однородными граничными условиями на подложках элемента. Создан новый тип q -пластинок с фазовым ядром, работающих как микроструктурированные полуволновые пластинки, которые позволяют сформировать пучки, несущие массивы заданного количества фазовых и поляризационных сингулярностей. Доказана возможность возбуждения контролируемого количества оптических вихревых пучков N с единичным топологическим зарядом, определяемым зарядом пластинки q как $N = 2q$. Построена теоретическая модель фазово-поляризационного преобразования света разработанными ЖК-элементами, учитывающая эффект влияния несингулярной компоненты (гауссов пучок), прошедшей через область фазового ядра q -пластинки на поле оптической сингулярности в приближении мод Лагерра — Гаусса.

Были также предложены оригинальные электрически управляемые микроструктурированные твист-ЖК-элементы для возбуждения фазовых и поляризационных сингулярных световых пучков, также не требующих точной электрической подстройки под спектральную компоненту лазерного излучения. Проведен теоретический анализ электрооптических свойств разработанного q -твистера с учетом проявляемых S - и твист-эффектов и показано, что в отличие от классической q -пластинки предложенный q -твистер представляет собой действие двух независимых электроуправляемых ЖК-подслоев, позволяющих обеспечить ахроматические условия формирования сингулярных пучков.

Отсутствие требований электрической подстройки на определенную длину волны излучения подтверждены экспериментальными исследованиями по формированию поляризационных сингулярных световых пучков в широком спектральном диапазоне с использованием параметрического генератора излучения. На рис. 12 представлены поперечные распределения интенсивности при формировании трех поляризационных сингулярностей на фронте светового пучка. Видно, что поляризационная сингулярность наблюдается в спектральном диапазоне $\lambda = 500 - 1100$ нм. Падение контрастности изображения в ИК-области связано с падением чувствительности регистрирующей ПЗС-матрицы (прибор с зарядовой связью) в ИК-диапазоне спектра.

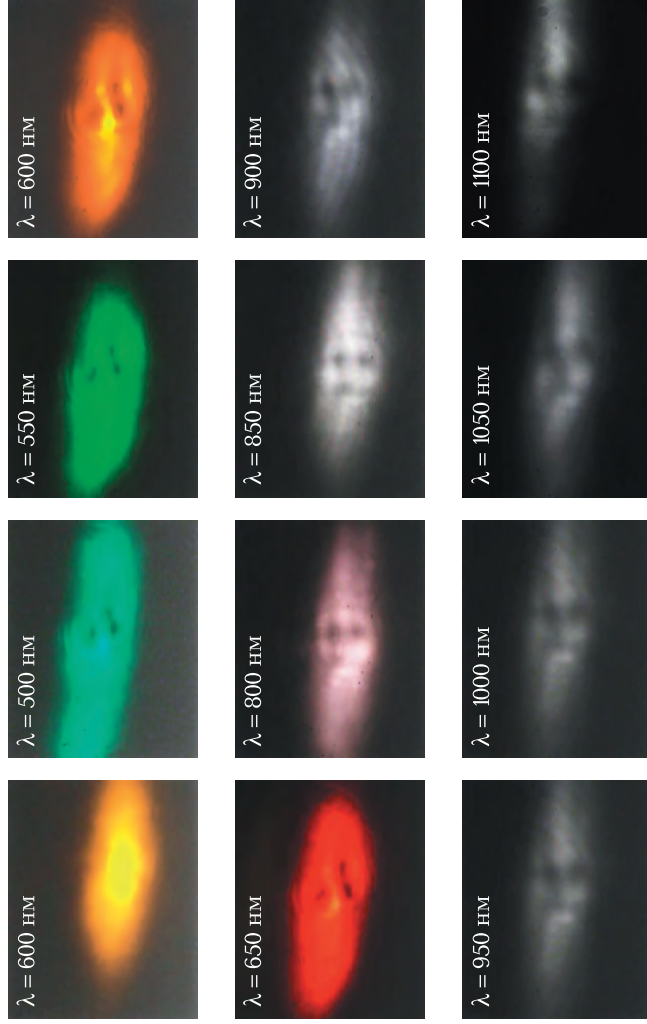


Рис. 12. Распределение интенсивности
в профиле исходного лазерного пучка ($\lambda = 600$ нм) и в поляризационных
сингулярных световых пучках для различных длин волн

На примере твист-ЖК-элемента проведены экспериментальные исследования преобразования фазовой топологии сингулярных пучков, прошедших через элемент. Продемонстрирована возможность увеличения и уменьшения топологического заряда оптического вихря в зависимости от геометрии входа света в твист-ЖК-элемент. Эти результаты были использованы для реализации режима оптического захвата и вращения микрочастиц в схеме оптического пинцета.

В заключение обзора работ по ЖК-тематике следует отметить также экспериментальные исследования динамических голограмм, формируемых при четырехволновом взаимодействии в ориентированном слое нематического ЖК, активированного красителем. Е. А. Мельникова вместе с дипломницей А. С. Бондарчук реализовали схему управления дифракционной эффективностью динамических голограмм в ЖК-композитах «НЖК-807 — родамин-6Ж» и «НЖК-807 — ПК 7098» за счет контролируемого изменения их оптической толщины. Экспериментально было реализовано электрическое управление дифракционной эффективностью динамических голограмм при проявлении перехода Фредерикса.

ДОСТИЖЕНИЯ
КАФЕДРЫ
ЗА ПОСЛЕДНИЕ
10 ЛЕТ

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ГПНИ «Конвергенция», подпрограмма «Современное естествознание в технологии будущего», задание 3.1.03 «Разработка методов и технологии создания анизотропных жидкокристаллических фотонных структур и оптимизация их оптических и оптоэлектронных свойств для квантово-оптических приложений» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 01.01.2011 по 31.12.2015).

Разработаны методы и технологии создания ЖК-фотонных структур с управляемой топологией анизотропии. В среде *Delphi* разработана рабочая программа, позволяющая рассчитывать конфигурацию электростатического поля, ориентацию директора ЖК и изменение показателя преломления в электрически управляемых волноводных элементах. Исследованы особенности отражения световых пучков на границах раздела двух областей нематического ЖК с ортогональной ориентацией директора. Установлена зависимость распространения световых пучков от поляризации лазерного излучения и показана возможность реализации эффекта полного внутреннего отражения и пространственного разделения поляризационных мод на ориентационной границе двух мезофаз. Реализованы режимы волноводного распространения световых пучков в элементах с различной топологией ориентации директора. Разработаны компьютерные топологические схемы, позволяющие создавать заданную микроструктуру ориентации директора ЖК в плоскости оптического транспаранта. По разработанным шаблонам изготовлены электропроводящие стеклянные подложки, использованные при изготовлении ЖК-ячеек с пространственно модулированной топологией ориентации

директора. Отработана технология формирования текстурированной ориентации ЖК, которая использует многослойную структуру фотосшиваемого материала с последовательной независимой обработкой каждого слоя, включающей механическое натирание слоя в заданном направлении и последующее воздействие УФ-излучения. Созданы экспериментальные образцы электрически управляемых волноводных элементов с шириной волноводного слоя 10 мкм с различными топологиями модуляции директора ЖК, включающие выполнение функций сложения и разделения световых пучков; оптимизированы их схемы и дизайн.

Научная новизна и практическая значимость исследований определяется использованием новых современных полимеризующихся композиций и оригинальных фотоориентантов для формирования заданных пространственных структур с высоким градиентом показателя преломления и высоким пространственным разрешением. Основным достоинством разрабатываемых оптических элементов является технологичность и дешевизна их производства, возможность функциональной перестройки.

ГПНИ «Медицина и фармация», подпрограмма «Фармакология и фармация», задание 2.15 «Разработка лекарственного средства на основе сенсibilизатора нового поколения для фотодинамической терапии новообразований с активацией светом ближнего ИК-диапазона» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2012 по 31.12.2015).

Изучался комплекс спектрально-люминесцентных характеристик в различных растворителях для новых трикарбоцианиновых красителей, связанных с полиэтиленгликолями различной массы. В целях разработки люминесцентной методики контроля качества лекарственной формы фотосенсibilизатора проведена проверка стабильности фотосенсibilизатора на основе трикарбоцианинового красителя. Установлено, что сенсibilизатор на основе трикарбоцианинового красителя, ковалентно связанного с полиэтиленгликолем, стабилен в диапазоне температур 20 — 40 °С и при хранении без доступа света в изотоническом растворе 5%-й глюкозы. Наличие объемных заместителей в молекуле фотосенсibilизатора — полиэтиленгликолей — способствует повышению фотостабильности.

Важнейшей характеристикой лекарственных препаратов является фармакокинетика — зависимость концентрации субстанции в тканях от времени после введения. Для соединений, обладающих флуоресценцией, таких как фотосенсибилизаторы для ФДТ, фармакокинетiku можно определять путем анализа изменения интенсивности сигнала флуоресценции в зависимости от времени после введения препарата. Измерения в таком случае можно проводить без выделения органов и экстракции, что в значительной степени позволяет ускорить процесс получения данных.

В результате исследования эффективности ФДТ злокачественных опухолей на лабораторных животных *in vivo* для определения наилучших условий фотовоздействия установлено: при воздействии излучением с $\lambda = 780$ нм глубина повреждения опухолевых тканей в 1,5 раза больше по сравнению с $\lambda = 750$ нм.

Результаты могут быть использованы в интересах Министерства здравоохранения Республики Беларусь, в организациях и учреждениях, выполняющих работы по созданию фотоактивируемых препаратов и методик для биомедицинских применений (в частности для диагностики и терапии онкозаболеваний).

ГПНИ «Информатика и космос, научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций», подпрограмма «Космические исследования-2015», задание 3.3.14 «Разработка принципов построения приборов для мультиспектральной съемки земной поверхности с повышенным спектральным разрешением и контрастом на основе дисперсионных селекторов» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2013 по 31.12.2015).

Получено теоретическое описание спектральных характеристик монохроматора изображения с дифракционной решеткой и вычитанием дисперсии при обратном прохождении. Доказано, что ширина выделяемой спектральной полосы в первом приближении не зависит от размера входной апертуры, а определяется размером отверстия в маске и дисперсией системы, при этом пространственное и спектральное разрешения не зависят друг от друга. Разработана оптическая система малоабберационного монохроматора изображения с вычитанием дисперсии при обратном прохождении, достоинствами которой являются светосила, подавление излучения вне выделенного спектрального диапазона, простота спектральной перестройки.

Разработан метод восстановления оптического спектра ограниченного спектрального диапазона по короткой интерферограмме с использованием генетического алгоритма, показавший в ходе численного моделирования улучшенную точность спектральной оценки по сравнению с преобразованием Фурье, регуляризационным методом и ESPRIT. Преимуществами метода также являются отсутствие необходимости пост-обработки и фазовой коррекции интерферограмм, применимость для различных типов интерферограмм, включая негармонические. Инструментальная реализация метода может осуществляться посредством статического интерферометра, перед которым размещается скрещенная диспергирующая система, что позволяет получать на матричном фотодетекторе несколько интерферограмм разных спектральных диапазонов.

Разработан и теоретически обоснован метод получения пространственно-спектральной информации при единовременной регистрации с использованием дисперсионных селекторов и многощелевых масок, обладающий улучшенными характеристиками по разрешению и светопропусканию с подавлением излучения с длиной волны вне выделенного спектрального диапазона. Изготовлено несколько вариантов многощелевых масок, создан макет дисперсионного многощелевого спектрометра, проведены экспериментальные наблюдения с использованием разных типов масок и призм малой дисперсии. Сформулирована общая идея процедуры калибровки по длинам волн спектрометра, реализующего предложенный метод. Разработана система управления съемкой пространственно-спектральной картины.

Результаты исследований могут быть использованы при создании инструментов для мультиспектральной съемки земной поверхности с повышенными спектральным разрешением и контрастом.

ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы», подпрограмма «Кристаллические и молекулярные структуры», задание 1.19 «Разработка и исследование оптических свойств наноструктурированных материалов на основе полиметиновых красителей и соединений четырех- и пятивалентного урана для экологических и медицинских применений» (научные руководители — Е. С. Воропай, А. И. Комяк, исследование выполнялось в период с 01.01.2014 по 31.12.2015).

Изучены процессы, происходящие в плазме при воздействии на мишень сдвоенных лазерных импульсов энергии порядка 70 мВт для получения оксидов тяжелых металлов (в частности урана) на пористой поверхности оксида алюминия. С помощью методов колебательной и электронной спектроскопии проанализированы продукты фотохимических реакций, происходящих в наноклстерах нитратов и перхлоратов уранила. Установлено присутствие в реакциях соединений уранила высокореактивных кластеров урана с пониженной валентностью (от трех до пяти), которые могут использоваться в качестве катализаторов химических реакций, что подтверждается примерами полимеризации простейших органических молекул (в частности ацетона) на шероховатой поверхности окиси алюминия. На основе квантово-механических расчетов методом теории функционала плотности проанализированы модели простейших оксидов урана, которые согласуются с рентгеноструктурными и экспериментальными спектральными данными.

Выполненные исследования электронных и колебательных спектров представляют химико-аналитическую значимость для проведения анализов на присутствие вредных примесей, содержащих ионы урана в разной степени окисления (от трех до шести). Результаты могут применяться в машиностроении при определении примесей тяжелых металлов, при анализе отходов для обнаружения присутствия тяжелых элементов, а также в спектральном анализе для обнаружения малого присутствия элементов.

Проведен анализ фотофизических и фотохимических свойств новых композитов ПК. Исследована кинетика накопления наноструктурированных фотосенсибилизаторов на основе ПК на животных-опухоленосителях, а также результативность ФДТ при фотовоздействии излучением лазера или светодиода ближнего ИК-диапазона. Изучена фотоактивность наноструктурированных фотосенсибилизаторов на основе ПК в клеточной культуре в условиях гипоксии и оксигенации. Проведены исследования возможности применения наноструктурированного ПК в качестве маркера результативности сеанса ФДТ онкологических заболеваний.

Материалы на основе ПК могут быть использованы в медицине и фармации.

ГПНИ «Электроника и фотоника», подпрограмма «Фотоника», задание 2.3.05 «Разработка методов, аппаратных

средств и препаратов для оптической диагностики и фототерапии патологических состояний организма с использованием лазерных и светодиодных источников» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2014 по 31.12.2015).

Исследованы спектрально-люминесцентные характеристики трикарбоцианинового красителя с различными противоионами в этаноле. Определены значения квантового выхода и длительности флуоресценции, а также квантового выхода образования синглетного кислорода для красителя с разными противоионами. Доказано, что в полярном этаноле данные параметры для красителя с разными противоионами имеют одинаковые значения. Отсутствие различий квантовых выходов синглетного кислорода при тех же условиях свидетельствует о полной диссоциации молекул красителя на свободные ионы и, как следствие, об отсутствии влияния тяжелого атома аниона.

Определена темновая токсичность новых трикарбоцианиновых красителей на культуре клеток линии *Raji*. Установлено, что нетоксичными концентрациями для данных клеток являются: менее $4,5 \cdot 10^{-6}$ моль/л — для красителя с полиэтиленгликолем и менее $3,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л — для исходного соединения.

Установлено, что равновесный уровень накопления красителя с полиэтиленгликолем более чем в шесть раз выше по сравнению с исходным соединением, а процесс накопления исследованных красителей зависит от температуры. Конъюгированный с полиэтиленгликолем краситель отличается большей чувствительностью к изменению температуры, что может быть обусловлено отличиями в механизмах проникновения данного фотосенсибилизатора в клетку.

Результаты могут найти применение при разработке и внедрении в практику новых материалов и высокочувствительных лазерно-оптических методов медицинской диагностики и терапии.

ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика», подпрограмма «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии», задание 3.3.18 «Влияние сопутствующих элементов, входящих в отходы ядерного топлива, на фотокаталитические свойства урана» (научные руководители — Д. С. Умрейко, А. И. Комяк, исследование выполнялось в период с 01.01.2014 по 31.12.2015).

Изучены фотохимические процессы, происходящие в солях шестивалентного урана (нитратные и перхлоратные соединения урана) при воздействии на них световых потоков от светодиода мощностью 5 – 10 мВт в области 420 – 440 нм, которая соответствует максимальному поглощению для иона уранила UO_2^{2+} в течение длительного времени облучения (до 2 ч).

Установлено, что в процессе фотохимических реакций в различных донорных растворителях типа ацетона и диметилсульфоксида обнаруживаются продукты, в которых уран имеет низшую степень окисления, равную трем, четырем и пяти. При этом возбужденные ионы урана проявляют ковалентную активность, ведущую к полимеризации простейших органических соединений типа ацетона, что может быть использовано при очистке радиоактивных отходов.

Выполненные с использованием теории функционала плотности расчеты моделей структур предложенных нанок комплексов, в которых уран имеет различную степень окисления, показали удовлетворительное совпадение строения комплексов с имеющимся спектральными и структурными экспериментальными данными.

Присутствие в растворе катионов металлов, а также анионов не препятствует протеканию фотохимических реакций в ионе уранила, однако электронные и колебательные спектры будут испытывать наибольшие изменения, что приведет к расширению возможности анализа жидких радиоактивных отходов.

Результаты исследований могут применяться в машиностроении при определении примесей тяжелых металлов, при анализе отходов для обнаружения присутствия тяжелых элементов в результате работы реакторов, а также в спектральном анализе для обнаружения малого присутствия элементов.

ГПНИ «Электроника и фотоника», подпрограмма «Фотоника-2015», задание 2.2.18 «Разработка методов формирования и диагностики микро- и наноструктурированных оптических элементов и создание фазово-поляризационных систем на основе фоторефрактивных и жидких кристаллов» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 01.01.2014 по 31.12.2015).

Разработаны методы расчета распространения сверхкоротких лазерных импульсов в одномерных периодических и квазипериодических фотонных структурах и лазерного воздействия на металлические наноструктуры. Предложена теоретическая модель энергетических уровней в запрещенной зоне фоторефрактивных кристаллов силиката и титаната висмута, позволяющая описать динамику фотопроводимости и фотоиндуцированного поглощения. Определены условия преобразования топологического заряда и поляризации гауссовых, бесселевых и сингулярных световых пучков при их распространении в ЖК-ячейках, включая поворот плоскости поляризации, преобразование линейной поляризации в круговую, а также одновременное преобразование топологического заряда бесселева пучка с изменением состояния его поляризации. Установлены основные закономерности поляризационного четырехволнового взаимодействия при записи сингулярных динамических голограмм и определена таблица состояний поляризации дифрагированной волны при различных поляризациях записывающих сингулярную голограмму волн. Созданы макеты оптоэлектронных ЖК-элементов, преобразующих топологический заряд и поляризацию бесселевых, гауссовых и сингулярных световых пучков. Разработан дизайн и изготовлена партия (450 шт.) электрически управляемых ЖК-элементов для экспериментального тура международной олимпиады по физике 2014 г. (Республика Казахстан).

ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Фотоника», задание 1.4.02.1 «Разработка лазерных атомно-эмиссионных многоканальных спектроскопических методов экспресс-анализа элементного состава биологических субстратов человека» (научный руководитель — А. П. Зажогин, исследование выполнялось в период с 01.01.2016 по 31.12.2018).

Разработана методика анализа биологических образцов, высушенных на поверхности полиметилметакрилата, для определения содержания макроэлементов в них с помощью метода многоэлементного лазерного атомно-эмиссионного спектрального анализа. Созданы методики подготовки биологических образцов для определения содержания микро- и макроэлементов в них с помощью метода многоэлементного атомно-эмиссионного спектрального анализа. Для проведения количественного анализа содержания микро- и макроэлементов в биобъектах разработана методика нанесения и определены временные диапазоны сушки образцов.

Проведены оценки возможности использования морфологических и спектрометрических исследований фаций плазмы крови пациентов с онкологическими заболеваниями для контроля процесса реабилитации.

Оценка и сравнение морфологических снимков фаций БЖ и спектральное определение содержания кальция как на поверхности, так и в слоях высохшей капли данных жидкостей с помощью метода лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии могут быть успешно использованы для досимптоматической диагностики и профилактики заболевания, уточнения диагноза, а также контроля за ходом восстановления организма.

Технико-экономическая эффективность предложенного метода определения содержания массовых долей элементов в материалах и средах заключается в сведении к минимуму числа используемых стандартных образцов, расширении области практического применения высокоэффективных лазерных атомно-эмиссионных методов анализа, сокращении времени выполнения данных анализов. В результате повышаются экономичность и экспрессность анализов, расширяется область использования спектральных методов количественного анализа.

ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Нanomатериалы и нанотехнологии», задание 2.35 «Разработка методов создания и исследование физико-химических свойств наноструктурных материалов на основе полиметиновых красителей, ультрадисперсных алмазов и нанокристаллов урана для медицинских и других применений» (научные руководители — Е. С. Воропай, А. И. Комяк, исследование выполнялось в период с 01.01.2016 по 31.12.2018).

Обнаружено, что молекулы индотрикарбоцианинового красителя в водно-этанольных растворах могут самоорганизовываться в наноструктуры. Изучены оптические свойства самоорганизованных наноструктур индотрикарбоцианинового красителя в растворах вода — этанол «при различных концентрациях красителя и объемном» содержании этанола. Полученные результаты перспективны для создания систем с высокой эффективностью преобразования и переноса энергии в солнечных элементах и других устройствах оптоэлектроники.

Изучены фотохимические процессы, происходящие в комплексных соединениях шестивалентного урана (так называемых ураниловых соединениях) при воздействии на них световыми потоками (~5 мВт, 420 – 440 нм). Установлено, что под действием УФ-радиации в комплексе шестивалентного урана происходят фотохимические реакции, в которых уран имеет различные степени окисления от +3 до +6. По мере увеличения времени облучения интенсивность полос поглощения соединений пяти- и четырехвалентного урана увеличивается по линейному закону в пределах исследуемой интенсивности (~5 мВт). Анализ окислительно-восстановительных потенциалов ионов урана показал, что ион UO_2^{2+} может выступать и как окислитель фотохимического процесса и как восстановитель, что определяется тем, в какой паре он работает: $\text{UO}_2^{2+} / \text{U}^{4+}$ или $(\text{UO}_2^+)^* / \text{UO}_2^{2+}$, т. е. возбужденные ионы уранила проявляют двойственность (дисмутацию) в фотохимических процессах.

С помощью методов ИК-спектроскопии установлены колебательные интервалы либрационных колебаний молекулы воды, по изменению частот которой можно определять структуру координационной сферы иона уранила. Фоновые примеси в значительной мере влияют на положение электронных и колебательных полос и значительно меньше — на протекание фотохимических реакций, что можно использовать в практике физико-химического анализа для определения содержания различных неорганических и органических примесей.

Полученные результаты могут найти применение в лабораторной практике при физико-химических методах анализа образующихся новых материалов и их кластеров в процессах химических реакций при получении новых материалов, а также при анализе радиоактивных жидких отходов, образующихся в процессах ядерных реакторов и оставшихся в виде отходов (твелов).

Исследованы структура и примесный состав ультрадисперсных алмазов (УДА) марки УДА-ГО-СП производства научно-производственного закрытого акционерного общества «Синта». С использованием метода растровой электронной микроскопии установлено, что в сухом виде благодаря высокой активности поверхности частицы УДА образуют плотные первичные агрегаты размером 40 – 100 нм, которые в свою очередь объединяются в более рыхлые вторичные агрегаты размером в несколько микрометров. По данным рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния размер первичных частиц в агрегатах составляет 4,5 – 5 нм.

Исследована стойкость УДА к воздействию лазерного излучения. Установлено, что при увеличении размеров частиц УДА от 5 до 200 нм пороговая плотность мощности лазерного излучения, при которой начинается графитизация поверхности частиц на воздухе, увеличивается от 0,1 до 0,35 МВт/см². Показано, что использование водных суспензий УДА позволяет более чем на порядок повысить пороговую мощность графитизации УДА.

Полученные данные о влиянии температуры вакуумного отжига и мощности лазерного излучения на структуру и функциональный состав поверхности порошков УДА могут быть использованы для создания новых биологически активных соединений и фотосенсибилизаторов на основе УДА, а также при создании новых каталитических систем в интересах Министерства здравоохранения, концерна «Белнефтехим» и др.

ГПНИ «Химические технологии и материалы», подпрограмма 5 «Фармакология и фармация», задание 5.14 «Изучение химико-фармацевтических свойств субстанции фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя и ее стабильности; оптимизация условий фотовоздействия на опухолевые ткани в процессе фотодинамической терапии» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2016 по 31.12.2018).

В процессе проведения сеансов ФДТ происходит повреждение опухолевых тканей путем активации фотосенсибилизатора излучением. Для определения наилучших условий фотовоздействия проведены исследования эффективности ФДТ злокачественных опухолей на лабораторных животных *in vivo*: глубина повреждения перевиваемых опухолей Са М-1 крыс при воздействии светом с $\lambda = 750$ нм и $\lambda = 780$ нм. Установлено, что при воздействии излучением с $\lambda = 780$ нм глубина повреждения опухолевых тканей в 1,5 раза больше по сравнению с излучением с $\lambda = 750$ нм. Таким образом, в указанном спектральном диапазоне наблюдается рост глубины повреждения опухолевых тканей с увеличением длины волны использованного источника излучения. Для разрабатываемого фотосенсибилизатора в эксперименте на мышах ICR с привитой асцитной карциномой Эрлиха *in vivo* установлено, что при увеличении длины волны фотовоздействия с 750 нм до 780 нм (180 Дж/см²) и поддержания одинакового числа поглощенных квантов

света в единицу времени в единице объема ткани количество излученных животных увеличивается с 75 до 100 %. Установлено, что при фотовоздействии с $\lambda = 750$ нм и 180 Дж/см² через 24 ч после введения фотосенсибилизатора коэффициент торможения роста опухоли составляет 62 %, а при облучении через 1 ч после введения — 86 %.

Разработана методика определения стабильности состава активной фармацевтической субстанции фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя, которая базируется на анализе изменений формы спектра поглощения основы фотосенсибилизатора — трикарбоцианинового красителя в водном растворе в области 450 — 600 нм. С помощью этой методики путем хроматомасс-спектрометрических и спектрофотометрических исследований изучалась стабильность состава активной фармацевтической субстанции фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя. Установлено, что в течение года состав субстанции не изменился в условиях хранения при температуре 6 °С в герметичной упаковке.

В результате исследований фотостабильности трикарбоцианиновых красителей при воздействии излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 750$ нм установлено, что наличие объемных заместителей в молекуле фотосенсибилизатора — полиэтиленгликолей, способствует повышению их фотостабильности. Показано, что стерические препятствия, которые уменьшают вероятность образования синглетного кислорода, приводят к тому, что квантовый выход фотодеструкции для красителя в четыре раза меньше, чем для аналога без полиэтиленгликолей.

ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Фотоника», задание 1.2.01. «Разработка методов создания, контроля и диагностики оптических микро- и наноструктур и формирование на их основе световых пучков с заданной поляризационно-фазовой структурой» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 01.01.2016 по 31.12.2020).

Проведен анализ динамики светоиндуцированных процессов в кристаллах семейства силленитов и определены характерные времена релаксации, связанные с процессами фотопроводимости и фотоиндуцированного поглощения. Установлено существование мелких и глубоких ловушечных уровней, которые определяют оптические и электрические свойства кристаллов. Экспериментальные результаты демонстрируют необходимость учета коротко- и долгоживущих

ловушек для описания динамики фотопроводимости и наведенного поглощения в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов. Показана возможность описания процессов релаксации ловушечных уровней с помощью двухэкспоненциальных функций. Динамика фотопроводимости характеризуется временами порядка 100 нс и 10 мкс, в то время как для наведенного поглощения время существования короткоживущих ловушек составляет порядка 10 мс, а долгоживущих ловушек — несколько суток. При такой ситуации релаксационные переходы возможны как на центры прилипания, расположенные вблизи зоны проводимости, так и на глубокие ловушечные уровни, которые надо учитывать при построении комплексной теоретической модели, адекватно описывающей светоиндуцированные переходы в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов.



Исследования сингулярных световых пучков (2023)

Впервые реализовано спинорбитальное преобразование линейно поляризованных бесселевых световых пучков при их распространении в электрически управляемой ЖК-ячейке. Проанализировано изменение поляризационной, фазовой и пространственной структуры пучка и показано, что при распространении бесселева пучка вдоль директора ЖК генерируется пучок с ортогональной поляризацией,

при этом топологический заряд изменяется на две единицы. Основными преимуществами использования ЖК-ячеек для формирования бесселевых световых полей являются малая толщина ЖК-слоя (~20 мкм) и возможность электрического переключения. Преобразование части бесселева светового пучка нулевого порядка в пучок второго порядка и их последующее взаимодействие представляет интерес для решения задач оптической микроскопии при формировании бездифракционных световых пучков с заданными характеристиками.

Экспериментально исследованы особенности преобразования фазово-поляризационной структуры световых пучков разработанными ЖК-элементами в зависимости от приложенного к ним внешнего напряжения. Установлено, что электрически управляемые ЖК-элементы могут преобразовывать фазу и поляризацию световых пучков. Разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волной контролируется внешним электрическим полем, что позволяет использовать разработанные ЖК-элементы для лазерного излучения с разными длинами волн и упростить процедуру изготовления ЖК-ячеек, устраняя строгие требования к их толщине.

Показано формирование сингулярных световых пучков на выходе ЖК-элементов, причем суммарный топологический заряд формируемого оптического вихря однозначно определяется топологией директора ЖК (зарядом q -пластинки), при этом количество оптических вихрей составляет $n = 2q$.

ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Фотоника», задание 1.3.01. «Разработка оптических технологий и аппаратных средств, обеспечивающих повышение биологической активности излучения лазерных и светодиодных источников, для их эффективного применения в сочетании с другими физическими факторами в медицине и сельском хозяйстве» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2016 по 31.12.2020).

Изучены фотофизические свойства индотрикарбоцианиновых красителей с ортофениленовым мостиком в цепи сопряжения с привитыми к концевым группам молекул двумя полиэтиленгликолями с молекулярной массой 300. Наличие таких объемных заместителей привело к тому, что соединения стали растворимы в воде и резко уменьшилась их цитотоксичность.

Выявлены оптимальные условия, которые обеспечивают возможность корректной регистрации концентрации фотосенсибилизатора, активируемого светом ИК-диапазона в патологических и нормальных клетках *in vivo* с помощью диффузного флуоресцентного томографа.

В опытах *in vivo* разработана спектроскопическая методика определения мест локализации фотосенсибилизаторов при внутривенном введении и показано, что внутри клеток молекулы красителя локализованы в малополярном окружении, что характерно для липидных слоев клеточных мембран.

Полученные данные по исследованию фотоактивируемых препаратов и методик их применения можно исследовать при создании новых биологически активных соединений для тераностики заболеваний. Разработка методов оперативной бесконтактной диагностики практически всех параметров тканей и крови человека, влияющих на световой режим в среде, а также развитие теоретических основ для неинвазивного мониторинга фотофизических и фотохимических процессов, происходящих в ткани пациента при фототерапии, может представлять интерес для Министерства здравоохранения.

ГПНИ «Конвергенция-2020», подпрограмма «Объединение», задание 3.03 «Разработка материалов и технологий создания микроструктурированных жидкокристаллических элементов для фотонных приложений» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 01.01.2016 по 31.12.2020).

Определены условия возбуждения нематиконов — пространственных оптических солитонов в планарном ЖК-слое, изучены особенности их распространения и взаимодействия. Продемонстрирован захват и каналирование световых пучков с низкой оптической мощностью с помощью волновода, сформированного нематиконом. Показано, что взаимодействие двух нематиконов приводит к их пространственному притяжению и слиянию. Установленная зависимость угла отклонения одного из нематиконов от мощности второго позволяет осуществить оптическое управление нематиконами, что может быть использовано при создании компактных, дешевых и полностью оптических ЖК-переключателей. Экспериментально показано, что распространение нематикона в системе электрически управляемых ЖК-волноводов сопровождается дискретной дифракцией, что позво-

лило реализовать функции оптического разветвителя с управляемым количеством каналов для светового пучка с фиксированной интенсивностью путем варьирования управляющего напряжения.

Предложены новые геометрии электрически переключаемых волноводных ЖК-структур для пространственного управления световыми пучками. Экспериментально реализован контролируемый режим волноводного распространения лазерного излучения в ЖК-ячейках с электрически индуцированными волноводными каналами, а также в ЖК-ячейке с исходной многодоменной ориентацией директора. Изготовлены макеты волноводных ЖК-элементов планарного типа, реализующих управляемые функции передачи, разветвления и мультиплексирования линейно-поляризованных световых пучков видимой области спектра.

Оптимизирована технология задания ориентации директора ЖК, основанная на использовании композитной структуры, состоящей из буферного слоя поли-ε-капроамида и фотоориентируемого азокрасителя AtA-2, что позволило существенно увеличить параметр качества начальной ориентации ЖК ($q = 0,998$) в двухдоменных ячейках с фрагментарным электродом. На основе обнаруженного явления пространственного смещения рефрактивной границы под действием краевого электрического поля в двухдоменном ЖК-дефлекторе с фрагментарным электродом продемонстрировано пространственное микросканирование световым пучком с разрешением $(6,5 \pm 1,0)$ мкм/В. Показано, что использование фрагментарного электрода в форме дуги обеспечивает формирование криволинейной рефрактивной границы и позволяет реализовать контролируемое угловое отклонение световой волны, отраженной в условиях полного внутреннего отражения. В ячейке с дугообразной рефрактивной границей с радиусом кривизны 3 см и толщиной ЖК-слоя 20 мкм коэффициент пропорциональности углового отклонения от амплитуды напряжения составил $(2,5 \pm 1,0)$ мрад/В.

ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии», задание 2.78 «Новые функциональные материалы с наноразмерной структурой на основе ультрадисперсных алмазов, полиметиновых красителей и солей палладия» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2019 по 31.12.2020).

Исследованы фотофизические характеристики новых функциональных наноразмерных материалов на основе ультрадисперсных алмазов и их комплексов с ПК. Определены оптимальные параметры отжига, позволяющие получать наноалмазы с преимущественным содержанием на их поверхности лактонных и ангидридных функциональных групп. Разработан метод обработки ультрадисперсных алмазов для получения монофункционализированных объектов с высокой удельной поверхностью, заключающийся в последовательном выполнении операций вакуумного отжига при $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ и озонирования.

Исследованы процессы образования в водных растворах комплексов индотрикарбоцианинового красителя с ультрадисперсными алмазами, модифицированными термообработкой в вакууме, а также их спектральные свойства. Установлено, что в процессе комплексообразования красителя с ультрадисперсными алмазами детонационного синтеза важную роль играют карбоксильные группы в молекулах красителя.

Полученные данные о структуре и функциональный состав поверхности порошков наноалмазов и комплексов с красителями могут быть использованы для создания новых биологически активных соединений и фотосенсибилизаторов, а также новых каталитических систем в интересах Министерства здравоохранения, концерна «Белнефтехим» и др.

ГПНИ «Химические технологии и материалы», подпрограмма «Фармакология и фармация», задание 5.23 «Изучение фотодинамических свойств субстанции фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя в опытах *in vivo*; оптимизация условий фотовоздействия на опухолевые ткани с использованием источников излучения ближнего ИК-диапазона» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 01.01.2019 по 31.12.2020).

Проведены исследования по оптимизации физико-химических свойств субстанции фотосенсибилизатора на основе трикарбоцианинового красителя и параметров светового воздействия при ФДТ злокачественных опухолей.

Для установления биораспределения фотосенсибилизатора в жизненно важных органах животных с помощью флуоресцентного метода *in vivo* проведены исследования накопления фотосенсибилизатора в органах и тканях мышей линии C57Bl/6. В результате исследований

определено распределение фотосенсибилизатора в органах животных (кожа, печень, почки, селезенка, сердце, легкие, кишечник). Для разработки фотосенсибилизатора в модельных опытах на инбредных мышах, которым прививали мышиную меланому (Clone M-3), установлено, что через 45 минут после внутривенного введения фотосенсибилизатора достигается его максимальная концентрация в тканях меланомы, индекс контрастности накопления составляет 3,3 в промежутке времени 45 — 90 минут. С помощью флуоресцентного метода исследовано распределение фотосенсибилизатора в жизненно важных органах животных спустя 9 суток после его внутривенного введения в суммарной дозе 1,44 LD50. Установлено, что через 9 суток после последнего внутривенного введения фотосенсибилизатора животным его концентрация в жизненно важных органах уменьшается в четыре — шесть раз.

Изучена противоопухолевая активность фотосенсибилизатора на инбредных мышах, которым подкожно на наружную поверхность бедра прививали мышиную меланому (Clone M-3). Экспериментальным животным вводили фотосенсибилизатор, затем проводили сеанс ФДТ при воздействии излучением полупроводникового лазера с $\lambda = 750$ нм. После наблюдения за некрозом опухоли в зоне облучения установлено, что на 21-е сутки опухолей у облученных животных не выявлено, значение показателя торможения роста опухоли составило 100 %.

В результате проведения сеанса ФДТ при введении 350 мг/кг готовой лекарственной формы и фотовоздействии излучением лазера 750 нм с плотностью мощности 100 мВт/см², экспозиционной дозе 135 Дж/см² в отношении меланомы clone M-3 получена 100%-ая излеченность.

Результаты могут быть использованы в интересах Министерства здравоохранения, в организациях и учреждениях, выполняющих работы по созданию фотоактивируемых препаратов и методик для биомедицинских применений.

ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Фотоника», задание 1.3.01 «Разработка лазерных атомно-эмиссионных многоканальных спектроскопических методов экспресс-анализа элементного состава биологических субстратов человека с онкопатологией» (научный руководитель — А. П. Зажогин, исследование выполнялось в период с 01.01.2019 по 31.12.2020).

Объектом исследования являлись биосубстраты человека (кровь, плазма крови, ликвор и др.) и яичный альбумин.

Разработанные методики и стандартные образцы позволяют оценить общее содержание макроэлементов и локальное пространственное распределение кальция в высушенных каплях БЖ пациентов с онкопатологией. Найдено, что диагностическим признаком заболевания являются нарушения стандартного распределения макроэлементов в фазии БЖ.

В результате выполненных исследований предлагаются доступные оперативные методики оценки структурирования и полуколичественного определения эссенциальных элементов в высохшей капле БЖ. Морфологическая картина, определение метаболитов в плазме крови путем оценки локального пространственного распределения кальция в фазии являются дополнительным качественным материалом для установления взаимосвязей компонентов анализируемой БЖ и показывают возможность проведения постоянного мониторинга процессов, происходящих в организме. Полученная оперативная информация позволяет уточнить диагноз и скорректировать лечение, будет способствовать более глубокому пониманию характера протекания патологических процессов.

Проекты белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований

Ф12Р-075 БРФФИ «Распространение и нелинейное взаимодействие гауссовых, бесселевых и сингулярных световых пучков в пространственно неоднородных средах» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 15.04.2012 по 31.03.2014).

Разработаны новые интерференционно-голографические методы формирования световых пучков с заданной пространственной и топологической структурой. Созданы компьютерно-синтезированные дифракционные оптические элементы, позволяющие формировать сингулярные и бесселевые световые пучки. Определены параметры оптической схемы формирования импульсных сингулярных и бесселевых световых пучков высоких порядков, позволяющие произвести эффективное преобразование светового пучка с гауссовым профилем интенсивности в пучок с заданным распределением интенсивности и фазы. Разработана экспериментальная установка и реализо-

ваны методы голографической записи в фоторегистрирующих слоях транспарантов, позволяющие формировать вихревые и бесселевые световые пучки, изготовлены тестовые образцы фазовых транспарантов. Теоретически и экспериментально исследованы процессы самовоздействия и взаимодействия гауссовых, сингулярных и бесселевых световых пучков в средах с различным типом нелинейности.

Ф12Р-198 БРФФИ «Химически модифицированные формы тиофлавина Т – новые зонды для детекции и изучения структуры амилоидных фибрилл» (научный руководитель – Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 15.04.2012 по 31.03.2014).

Осуществлен синтез гемецианиновых и монокарбоцианиновых производных тиофлавина Т с различной степенью замещения как в ароматическом фрагменте структуры красителя, так и при атоме азота в пара-положении. Предложен альтернативный традиционному метод получения N,N-диметиламинофенилбензтиазолов в диметилсульфоксиде с окислением промежуточного производного дигидробензтиазола *in situ*.

Показано, что стерическое напряжение для планарной структуры 2,6-диметил-N,N-диметиламинофенилбензтиазола оказывает значительное влияние и на процесс получения данного соединения. Синтез различных модифицированных форм тиофлавина Т и сопоставление их спектральных свойств в водном растворе и при инкорпорации в амилоидные фибриллы со свойствами тиофлавина Т позволит получить экспериментальное подтверждение сделанных ранее предположений о ключевой роли метильной группы при атоме азота N5 в формировании уникальных спектральных свойств тиофлавина Т.

Дальнейший синтез и исследование новых производных тиофлавина Т с гидрофильными фрагментами и более длинной полиметиновой цепочкой позволяет получить флуоресцентные зонды, имеющие более длинноволновый спектр флуоресценции и возбуждения флуоресценции и большую стабильность в биологических структурах. Такое изменение спектральных характеристик существенно для тестирования амилоидных фибрилл в живых клетках и тканях.

Ф14Р-168 БРФФИ «Распространение и взаимодействие световых пучков в неоднородных средах с фоторефракцией» (научный руководитель – А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 23.05.2014 по 31.03.2016).

Построена теоретическая модель переориентации директора ЖК в ячейке с пространственно-структурированным электродом и распространения в ней светового пучка, проведено численное моделирование процессов распространения и самовоздействия вихревых световых пучков в поглощающих жидкостях в условиях конкуренции различных механизмов самовоздействия, экспериментально установлены закономерности преобразования пространственной структуры вихревых и бесселевых световых пучков при их распространении в растворах сложных органических соединений. Проведен сравнительный анализ эффективности самовоздействия для лазерных импульсов нано- и пикосекундной длительности. Созданы макеты пространственно-структурированных нематических ЖК-элементов и проведена оптимизация оптических схем для возбуждения и регистрации пространственных солитонов. Определены условия реализации эффектов нелинейного отражения и волноводного распространения световых пучков в ЖК.

Научная новизна и практическая значимость исследований заключаются в разработке и оптимизации методов создания пространственно-структурированных нематических ЖК-элементов, построении теоретической модели динамики распространения световых пучков в ЖК-элементах, а также в разработке физико-математической модели распространения импульсных сингулярных световых пучков в поглощающих жидкостях, установлении закономерностей возбуждения и нелинейного взаимодействия солитонов.

Ф14Р-226 БРФФИ «Новые флуоресцентные маркеры для изучения кинетики ранних стадий образования амилоидных фибрилл и протофибрилл» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 23.05.2014 по 31.03.2016).

Разработаны методы синтеза водорастворимых форм монокарбоцианиновых и дикарбоцианиновых бензтиазольных красителей, а также дикарбоцианиновых нафтотиазольных соединений по схемам, отличающимся простотой и доступностью исходных соединений. Впервые были синтезированы производные 4,4'-[(Е)-1,2-дифенилэтилен-1,2-диенил]-дифенола, содержащие сульфогруппу, повышающую водорастворимость данного соединения. Доказано, что синтезированные соединения обладают гомогенностью и индивидуальной чистотой, а также достаточной водорастворимостью для дальнейшего исследования их

фотофизических характеристик и определения эффективности в качестве флуоресцентных маркеров для обнаружения и изучения амилоидных фибрилл.

Ф16Р-099 БРФФИ «Акустоплазмонные наноструктуры для сверхбыстрого управления оптическим излучением» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 20.05.2016 по 31.03.2018).

Разработана физико-математическая модель лазерно-индуцированного возбуждения высокочастотных акустических импульсов в тонких металлических пленках и слоистых наноструктурах, разработаны численная и компьютерная модели для исследования закономерностей распространения сверхвысокочастотных акустических сигналов в периодических и квазипериодических многослойных наноструктурах. Продемонстрирован эффект формирования фононной запрещенной зоны для сверхвысокочастотных акустических сигналов при прохождении через многослойную наноструктуру типа фононный кристалл; рассчитаны величины деформаций, возникающих в данной структуре, в зависимости от энергии действующего лазерного импульса. Установлены закономерности формирования спектров пропускания акустических нанорезонаторов, сформированных в фононных кристаллах с дефектным слоем. Рассчитаны величины деформаций, возникающих в фотонных структурах, в зависимости от параметров действующего лазерного импульса. Исследованы закономерности преобразования спектров отражения одномерных фотонных структур в зависимости от характеристик возбуждаемых акустических импульсов.

Научная новизна проделанной работы заключается в исследовании закономерностей возбуждения высокочастотных акустических сигналов в многослойных наноструктурах и их взаимодействия с поверхностными плазмон-поляритонами. Практическая значимость результатов состоит в разработке новых методов сверхвысокочастотного управления характеристиками лазерного излучения.

Ф16Р-209 БРФФИ «Фемтосекундные фотоиндуцированные процессы в молекулярных роторах — эффективных флуоресцентных биомаркерах» (научный руководитель — Е. С. Воропай, исследование выполнялось в период с 20.05.2016 по 31.03.2018).

Разработаны высокоэффективные схемы синтеза моно- и дикарбостироловых бензтиазольных красителей, модифицированных полиэтиленгликолем. Предложенные синтетические схемы отличаются простотой, а также доступностью исходных соединений.

Проведен синтез новых производных тиюфлавина Т с улучшенными свойствами. Результаты хромато-масс-спектроскопических исследований полученных соединений показали, что синтезированные вещества обладают гомогенностью и индивидуальной чистотой, а также достаточной водорастворимостью для дальнейшего исследования их фотофизических характеристик. Установлено, что привитие полиэтиленгликоля не приводит к изменению формы спектров электронного поглощения и испускания.

Исследование кинетики затухания флуоресценции новых производных тиюфлавина позволит получить важную информацию для создания сверхбыстрых наноустройств на основе молекулярных роторов. Продолжение работ также перспективно для обнаружения новых подходов для выяснения механизмов формирования амилоидных фибрилл в модельных системах и организме и определения факторов, влияющих на этот процесс. Синтезированные соединения могут найти применение в качестве базовых компонентов новых флуоресцентных зондов для детекции и изучения структуры амилоидных фибрилл и протофибрилл.

Ф16МВ-006 БРФФИ «Оптимизация флуоресцентных методов контроля распределения фотосенсибилизаторов в организме и биологических системах» (научный руководитель — Л. С. Ляшенко, исследование выполнялось в период с 20.05.2016 по 31.03.2018).

Полученные данные могут быть использованы при разработке новых и оптимизации уже имеющихся методов контроля распределения исследуемых фотосенсибилизаторов в сыворотке крови человека, в модельных клеточных системах, а также тканях и организме в целом. Спектрально-флуоресцентные свойства исследуемых фотосенсибилизаторов (положение максимумов, степень поляризации флуоресценции и т. д.), связанных с белками сыворотки, значительно отличаются от свойств фотосенсибилизаторов, находящихся в водных растворах, что позволило разработать новые и оптимизировать имеющиеся методики контроля за распределением фотосенсибилизаторов.

Разработаны новые, основанные на спектрально-флуоресцентном анализе протоколы, позволяющие сравнивать характеристики процессов биораспределения различных типов фотосенсибилизаторов при проведении фотодинамической терапии. Данные протоколы могут быть успешно применены при отборе фотосенсибилизаторов с оптимальными затратами времени и финансов. Анализ корреляции различных методов определения количества фотосенсибилизаторов в органах и тканях животных-опухоленосителей показал, что при использовании каждой из методик необходимо тщательно проводить контрольные измерения и учитывать оптические свойства не только красителей и тканей, но и принимать во внимание изменения оптических свойств фотосенсибилизаторов при взаимодействии с окружающими биологическими структурами.

Ф18Р-141 БРФФИ «Лазерно-индуцированные оптоакустические эффекты в микро- и наноструктурированных материалах» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 01.06.2018 по 31.03.2020).

Разработаны физико-математическая модель лазерно-индуцированного возбуждения высокочастотных акустических импульсов в профилированных наноструктурах и компьютерная модель для исследования закономерностей распространения импульсных акустических сигналов. Продемонстрирована возможность генерации импульсных акустических пучков с вихревой структурой волнового фронта при поглощении энергии импульсного лазерного излучения в пространственно-неоднородной мишени переменной толщины. Рассчитаны пространственные профили акустических пучков, генерируемых в периодической структуре типа «металлическая нанорешетка» и проведено проектирование наноструктурированной поверхности с изменяющимся по заданному закону коэффициентом поглощения, перспективной для генерации высокочастотных акустических сигналов с заданной пространственной структурой.

Научная новизна работы заключается в исследовании закономерностей возбуждения импульсных акустических пучков с заданной пространственной структурой вследствие термомеханического воздействия импульсного лазерного излучения на микро- и наноструктурированные мишени и поверхности. Практическая значимость результатов состоит в разработке новых методов генерации сверхвысокочастотных акустических импульсных пучков.

Ф20МС-034 БРФФИ «Дифракционные жидкокристаллические 3D-элементы для контроля и управления световыми пучками» (научный руководитель — А. Л. Толстик, исследование выполнялось в период с 04.05.2020 по 31.03.2022).

Отработана технология изготовления многомерных дифракционных оптических ЖК-элементов на основе послойной текстурированной фотоориентации оригинальных азокрасителей. Функциональную основу предлагаемых фазовых ЖК-решеток составляют тонкие пленки полимеризуемого ЖК, характеризующиеся локально-неоднородной ориентацией директора. Использование водорастворимого азокрасителя позволило наносить фотоориентируемые пленки непосредственно на поверхность фотоотвержденного ЖК-материала без использования буферного слоя, что является важным технологическим преимуществом. Данный метод позволяет в общем случае изготавливать одно-, двух- и трехмерные дифракционные оптические структуры с различными профилями и/или периодами фазовых решеток.

С помощью метода поляризационной микроскопии установлено, что изготовленные фазовые решетки характеризуются бездефектной ориентацией ЖК, а величина периода дифракционной структуры совпадает с периодом амплитудной фотомаски, использованной в процессе текстурированной фотоориентации пленок азокрасителя. Предложена двумерная дифракционная ЖК-структура с периодом 20 мкм, представляющая собой комбинацию двух одномерных фазовых ЖК-решеток с взаимно-ортогональным направлением штрихов. Экспериментально исследовано состояние поляризации дифрагированных световых пучков для различных вариантов линейной поляризации падающего пучка.

Задания на 2021–2025 гг.

ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Фотоника и ее применения», задание 1.6.2 «Разработка оптических методов и средств тераностики с использованием излучения лазерных и светодиодных источников, лазерно-оптических приборов для биомедицинских применений» (научный руководитель — Е. С. Воропай); задание 1.14.1 «Разработка и исследование микро- и наноструктури-

рованных анизотропных оптических элементов для фазово-поляризационного преобразования световых полей» (научный руководитель — А. Л. Толстик).

ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктура», задание 2.03.4 «Разработка и исследование свойств конъюгатов на платформе наноразмерных алмазов и технологий создания биомаркеров и каталитических систем» (научный руководитель — Е. С. Воропай).

ГПНИ «Конвергенция — 2025», подпрограмма «Междисциплинарные исследования», задание 3.02.5.1 «Разработка 3-D фотонных структур на основе жидкокристаллических и полимерных материалов для приложений биофотоники» (научный руководитель А. Л. Толстик); задание 3.03.6.1 «Разработка лазерно-оптических технологий применения биозондов с флуоресценцией в ближнем ИК-диапазоне для диагностики локализации патологических тканей» (научный руководитель — Е. С. Воропай).

ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование», подпрограмма «Научно-учебное оборудование», задание 54 «Разработать и изготовить модульный научно-учебный лазерный комплекс на основе активных и пассивных волоконно-оптических элементов» (научный руководитель — А. Л. Толстик); задание 61 «Разработать лазерный спектрофлуориметр для спектрально-кинетического люминесцентного анализа в экспериментальной физике и биологии» (научные руководители — М. П. Самцов, Е. С. Воропай).

Проект БРФФИ № Ф22-091 «Бесконтактная диагностика функциональных материалов методом динамических решеток» (научный руководитель — А. Л. Толстик).

ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Одним из достоинств кафедры лазерной физики и спектроскопии является внедрение результатов научных исследований в практику. Ряд разработок в течение последних 10 лет были реализованы в рамках ГНТП **«Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований»** («Эталоны и научные приборы»), подпрограмма «Разработка и изготов-

ление научно-учебных комплексов и оборудования» («Научно-учебное оборудование»). Ниже приведены оригинальные разработки кафедры.

Договор «Разработать и изготовить детали и узлы лазерного видео-микроспектрометрического комплекса (ВМСК)» в рамках задания 3 «Разработать и изготовить лазерный видео-микроспектрометрический комплекс (ВМСК) для анализа характеристик пространственно сложных объектов» (научный руководитель — А. И. Серафимович, работа выполнялась в период с 01.04.2011 г. по 01.04.2014 г.) (рис. 13).

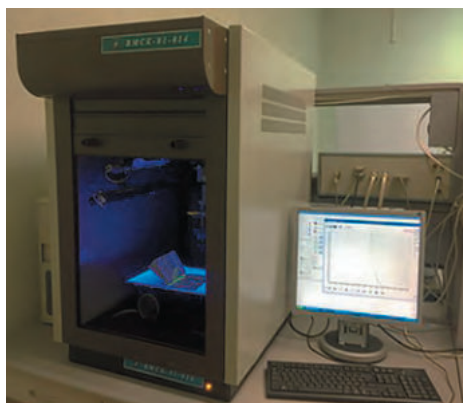


Рис. 13. Видео-микроспектрометрический комплекс для анализа характеристик пространственно сложных объектов

Прибор разрабатывался совместно с лабораторией спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко. При создании микроспектрометрического модуля ВМСК предусматривались следующие его функциональные возможности:

- получение спектров люминесценции и спектральных характеристик в отраженном свете от выбранных участков документа (локальная микроспектрометрия) со спектральным разрешением до 6 нм;
- освещение (и возбуждение люминесценции) участков исследуемых объектов квазимонохроматическим излучением от набора светодиодных и лазерных источников (УФ-полупроводниковые лазеры, лазеры ближнего ИК-диапазона для возбуждения люминесценции микрообъектов);

– анализ поляризационных характеристик люминесценции от выбранных микрообъектов.

Правильная настройка освещения микроспектрометрического канала ВМСК является одним из важнейших факторов, определяющих качество изображения в микроскопе, которое анализируется цифровой фотокамерой и малогабаритным спектрометром. Для освещения объекта исследований с помощью микроскопа в настоящее время применяются самые различные источники света. Сила света источника должна быть велика, а излучаемая площадка мала, чтобы источник по типу приближался к точечному. Существуют различные способы освещения объекта исследований при микроскопии. В конструкции ВМСК использованы практически все. Метод косого освещения, применяемый при мультizonальной съемке, служит получению первичной спектральной информации в «белом» и УФ-излучении и в микроспектрометрическом канале. Метод светлого поля в отраженном свете является основным при получении всего многообразия спектральных данных от выбранного микрообразца в протяженном макрообъекте исследования. Метод светлого поля в отраженном свете реализован в виде кольцевого осветителя, содержащего весь необходимый набор источников оптического излучения.

Задание 7 «Разработать и изготовить модульный научно-учебный лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации» (научный руководитель — А. Л. Толстик, работа выполнялась в период с 01.04.2011 г. по 01.10.2013 г.).

Разработан универсальный лазерный комплекс с возможностью перестройки частоты генерации, состоящий из трех модулей — лазер на красителе с дисперсионным резонатором (рис. 14), лазер на красителе с распределенной обратной связью (РОС) (рис. 15) и лазер на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) света (рис. 16).

Созданный лазер на красителе позволяет работать в различных диапазонах длин волн, причем возможна не только перестройка частоты генерации, но и выбор механизма перестройки, что в свою очередь определяет мощность генерируемого излучения. Для модуля с дифракционной решеткой спектральный диапазон перестройки частоты лазера на красителе составил 100 нм, для модуля, использующего в качестве перестраивающего элемента призму, — 50 нм.



Рис. 14. Лазер на красителе с дисперсионным резонатором

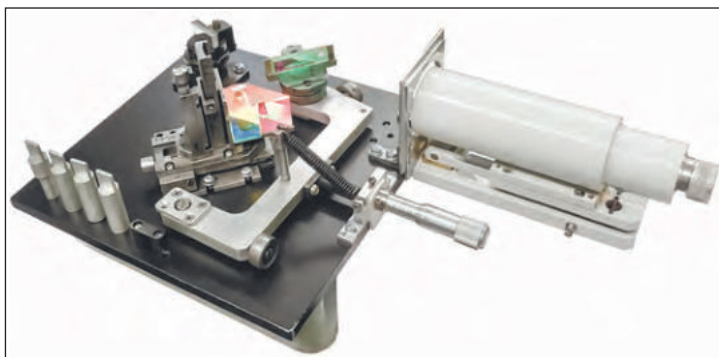


Рис. 15. Лазер на красителе с РОС

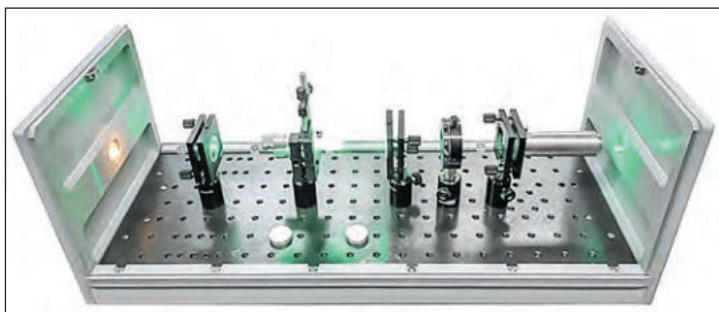


Рис. 16. Лазер на ВКР света

При накачке РОС-лазера на этанольном растворе DCM-импульсами с энергией $\sim 2,5$ мДж диапазон перестройки длины волны генерации составил 97 нм (588 — 686 нм), при этом спектр излучения состоит из одиночной линии с шириной $\sim 0,01$ нм. Подобные результаты при исследовании спектрально-энергетических характеристик излучения РОС-лазера были получены и при использовании этанольных растворов оксазина 17. Главным отличием в этом случае было смещение максимума контура усиления и, соответственно, области перестройки длины волны генерации в длинноволновую область. Диапазон перестройки длины волны генерации составил 80 нм, при этом в области максимума контура усиления (640 — 650 нм) КПД генерации достигал 35 %.

Была реализована перестройка частоты и на основе ВКР-преобразования. Оптимизация параметров ВКР-лазера на кристалле $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ позволила получить шесть стоксовых компонент при возбуждении колебаний вдоль двух кристаллографических направлений. Особенностью разработанного лазера является демонстрация зависимости спектра ВКР-преобразования от поляризации лазерного излучения накачки. При поляризации вдоль каждой кристаллографической оси возбуждаются три стоксовые компоненты. Поворачивая полуволновую пластинку на входе лазера можно возбудить колебания по отдельности вдоль каждой оси, а при поляризации под углом 45° — одновременно вдоль двух направлений.

Модульный научно-учебный лазерный комплекс внедрен в образовательный процесс, позволив создать три лабораторные работы спецпрактикума по лазерной физике и нелинейной оптике.

Задание 15 «Разработать и изготовить учебно-исследовательский модульный комплекс на основе лазера с диодной накачкой» (научный руководитель — Е. А. Мельникова, работа выполнялась в период с 01.12. 2011 г. по 01.12.2013 г.).

Комплекс включает: лазерный диод накачки с блоком управления и термостабилизации (рис. 17), лазерный кристалл Nd:YAG (рис. 18), нелинейный кристалл удвоения частоты КТР, пассивный затвор на основе $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$, малогабаритный спектрометр, комплект механических узлов и оптических элементов для монтажа и юстировки лазерного резонатора. Учебно-исследовательский комплекс позволяет изучить работу лазера в режимах свободной генерации и пассивной модуляции добротности, исследовать зависимость мощности генерации от тока

инжекции и температуры диода накачки, определить оптимальное значение полезных потерь резонатора, исследовать зависимость частоты следования лазерных импульсов от тока инжекции при работе лазера в режиме пассивной модуляции добротности. Особенностью разработанного комплекса является также возможность реализации внутрирезонаторной генерации второй гармоники.



Рис. 17. Лазерный диод накачки с блоком управления

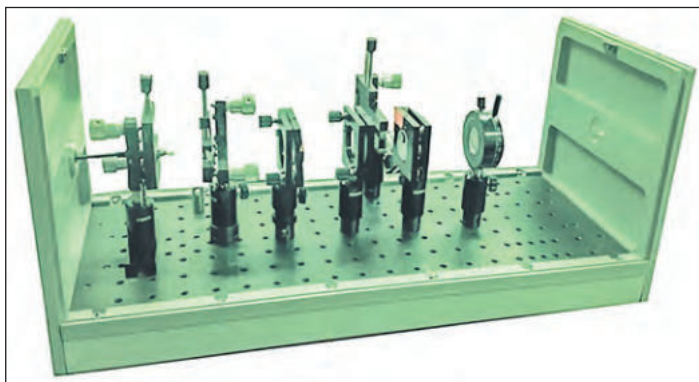


Рис. 18. Nd:YAG — лазер с диодной накачкой

Разработаны методические указания для проведения лабораторных работ «Спектральные и энергетические характеристики лазерного диода накачки», «Режим свободной генерации и пассивной модуляции добротности», «Режим генерации второй гармоники». Опытный образец внедрен в учебный процесс на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ.

Задание 20 «Разработать и изготовить научно-учебный лазерно-оптический комплекс для подготовки специалистов в области микро- и нанофотоники» (научный руководитель — А. Л. Толстик, работа выполнялась в период с 01.01.2014 г. по 01.12.2015 г.).

Лабораторный комплекс включает твердотельные лазеры с диодной накачкой (532 нм), полупроводниковые лазеры (650 нм), системы регистрации, набор фотополимерных голографических пластинок для записи голограмм на длине волны 532 нм, комплект механических узлов и оптических элементов (рис. 19). Изготовлены оригинальные дифракционные и волноводные пространственно-структурированные ЖК-элементы, позволяющие осуществлять электрическое управление световыми пучками.

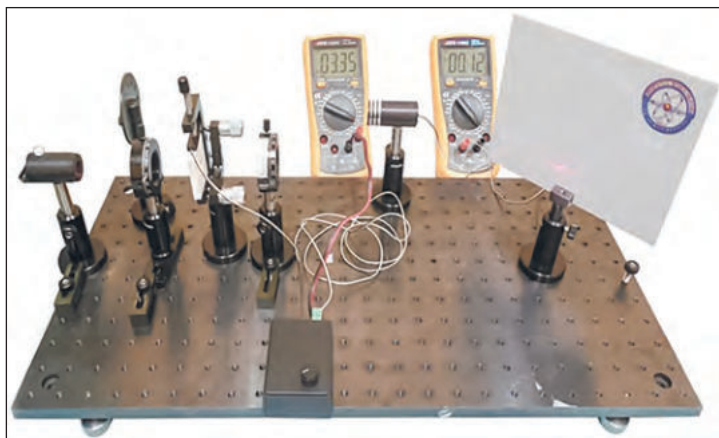


Рис. 19. Внешний вид опытного образца установки лабораторной работы по исследованию микроструктурированных ЖК-элементов

Комплекс позволил создать пять лабораторных работ: «Формирование наноструктур в фоточувствительном полимерном материале. Угловая и спектральная селективность», «Изучение свойств планарных волноводных структур», «Изучение свойств планарных волноводов с анизотропным показателем преломления и брэгговскими решетками», «Изучение дифракционных ЖК-элементов», «Изучение волноводных ЖК-элементов».

Задание 24 «Разработать и изготовить научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами» (научный руководитель — А. Л. Толстик, работа выполнялась в период с 01.07.2016 г. по 01.12.2019 г.).

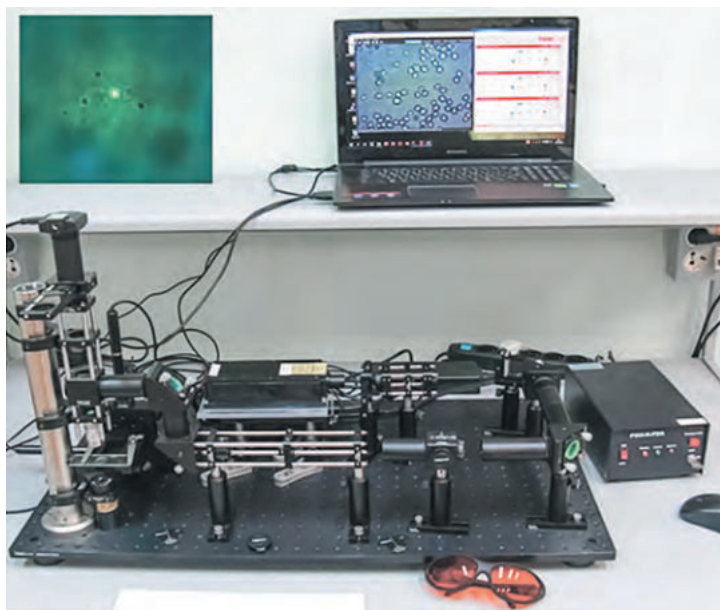


Рис. 20. Научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами

Создан научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами (рис. 20) и разработана структура лабораторного практикума с использованием автоматизированных системы управления микрочастицами и системы наблюдения за микрообъектами в условиях засветки гауссовыми и сингулярными световыми пучками. Научно-учебный комплекс позволяет изучить принцип работы оптического пинцета, осуществить захват и адресную доставку микрообъектов с использованием гауссовых и сингулярных световых пучков, исследовать влияние фазово-поляризационной структуры лазерного излучения на силу оптического захвата. Комплекс предназначен для проведения научных

исследований и использования при обучении студентов, магистрантов и аспирантов. Сфера применения: био- и нанофотоника, биоинженерия.

Задание 38 «Разработать и изготовить универсальный лазерный комплекс для изучения процессов получения и контроля состава многокомпонентных функциональных материалов методами лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии» (научный руководитель — Е. С. Воропай, работа выполнялась в период с 01.12.2017 г. по 01.12.2020 г.).



Рис. 21. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр

Универсальный лазерный комплекс (рис. 21) предназначен для лазерного атомно-эмиссионного микроанализа многокомпонентных промышленных изделий и предметов искусства, прямого послойного анализа с субмикронным разрешением защитных и функциональных многокомпонентных покрытий, элементного исследования неметаллических и пористых материалов, в том числе биообъектов и полимеров; а также для обучения студентов и специалистов современным аналитическим методикам количественного анализа, освоения процессов пробоподготовки сложных многокомпонентных объектов, находящихся как в твердом состоянии, так и виде растворов, проведения экспериментального определения параметров эрозивной лазерной плазмы.

Задание 39 «Разработать и изготовить научно-учебный лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов» (научный руководитель — Е. А. Мельникова, работа выполнялась в период с 01.07.2017 г. по 01.04.2020 г.).

Разработан и изготовлен научно-учебный лабораторный лазерный комплекс (рис. 22) на основе модернизированной непрерывной фемтосекундной диодной накачиваемой лазерной системы, генерирующей импульсы излучения длительностью порядка 90 фс с различными вариантами нелинейного оптического преобразования ее излучения в условиях со значительными проявлениями дисперсии: генерацией суперконтинуума и гармоник. Лабораторный лазерный комплекс включает лазерный источник импульсов фемтосекундной длительности, стенд по изучению генерации второй гармоники излучения ультракороткой длительности и стенд для генерации суперконтинуума.

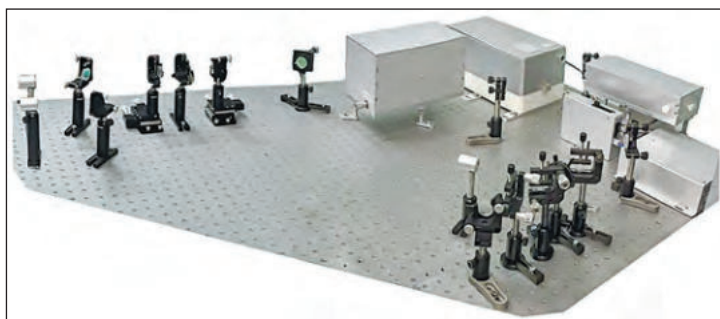


Рис. 22. Научно-учебный лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов

Научно-учебный лабораторный комплекс внедрен в учебный процесс и используется в лабораторном практикуме «Физика лазеров и нелинейная оптика». На его основе разработаны следующие лабораторные работы: «Временные и спектральные характеристики фемтосекундного лазера», «Генерация второй гармоники фемтосекундных импульсов», «Генерация суперконтинуума». Лабораторный комплекс позволяет на современном научно-техническом уровне организовать учебный процесс по изучению физических основ генерации ультракоротких импульсов и приобрести практические навыки по регистрации временных и спектральных характеристик лазерного излучения

фемтосекундной длительности, изучить различные варианты нелинейно оптического преобразования фемтосекундных импульсов — осуществить генерацию второй гармоники лазерного излучения и генерацию суперконтинуума.

Задание 44 «Разработать и изготовить модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов» (научный руководитель — А. Л. Толстик, работа выполнялась в период с 01.12.2018 г. по 01.12.2020 г.).

Комплекс включает задающий генератор на иттрий-алюминиевом гранате и нелинейно-оптические системы генерации гармоник, сложения частот, параметрического усиления и генерации (рис. 23). Позволяет на современном научно-техническом уровне изучить и освоить на практике методы перестройки частоты лазерного излучения посредством генерации гармоник и параметрического преобразования излучения.

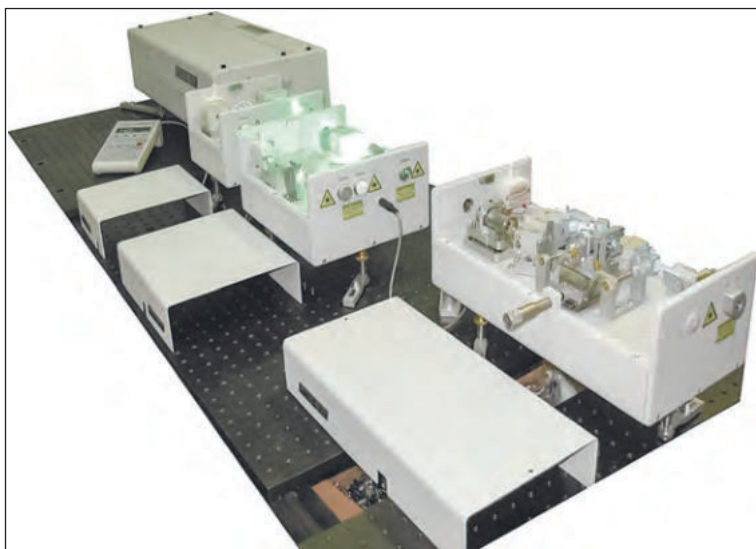


Рис. 23. Нелинейно-оптический лазерный комплекс по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов

Лазер, генерирующий излучение на длине волны 1064 нм, и приставка-преобразователь обеспечивают генерацию второй гармоники при использовании как I, так и II типа коллинеарного синхронизма. Для преобразования по I типу коллинеарного синхронизма используется кристалл LBO, а для преобразования по II типу — кристалл КТР. Для генерации третьей гармоники используются кристалл LBO (вырезан для преобразования по I типу скалярного синхронизма *ooe*) и кристалл KD*P (вырезан для преобразования по II типу скалярного синхронизма *eoe*), что позволяет изучить явления генерации суммарной частоты излучения.

Параметрический генератор света преобразует излучение третьей гармоники накачки (355 нм) в перестраиваемое излучение сигнальной (400 — 710 нм) и холостой волн (710 — 2600 нм) по II типу коллинеарного синхронизма. Измеренная перестроечная характеристика показала, что диапазон спектральной перестройки параметрического генератора света обеспечивает перестройку от 399 до 2646 нм. Эффективность преобразования в максимуме перестроечной кривой составила 37 %. Ширина линии генерации параметрического генератора света в диапазоне длин волн 450 — 550 нм составила менее 0,1 нм.

Нелинейно-оптический лазерный комплекс введен в учебный процесс на физическом факультете БГУ и предназначен для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований и обучения студентов современным методам преобразования спектральных характеристик лазерного излучения и основам конструирования лазерных систем с перестраиваемой по частоте генерацией.

ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО

Ряд совместных разработок выполнен кафедрой лазерной физики и спектроскопии под руководством А. Л. Толстика совместно с предприятием «ЛОТИС-ТИИ». Так, при выполнении задания «Разрабатывать и освоить в производстве базовую модель лазера на иттрий-алюминиевом гранате для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике» ГНТП «Лазерно-оптические системы и технологии» сконструировали лазер на базе которого поставлены лабораторные работы «Режим свободной генерации», «Активная модуляция добротности», «Пассивная модуляция добротности», «Генерация второй гармоники». Разработанная установка тиражировалась с использованием

производственных мощностей и сервисной службы поддержки предприятия «ЛОТИС-ТИИ». Было изготовлено 20 лазеров на иттрий-алюминиевом гранате, которые поставлены в университеты Республики Беларусь, а также зарубежных стран (Россия — 9, Тайвань — 3, Испания — 1, Япония — 1), включая такие ведущие вузы, как МГУ, МИФИ, Казанский федеральный университет, Университет Кантабрии и др. В рамках задания «Разработать и изготовить модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов» подпрограммы «Научно-учебное оборудование» ГНТП «Эталоны и научные приборы» осуществлен выпуск десяти нелинейно-оптических лазерных комплексов, которые поставлены в Россию, Китай, ОАЭ. Общая сумма продаж разработанных лазерных систем превысила 1 млн долл. США.

Активно велись работы с Научно-производственным РУП «Актив БГУ». В 2010 г. совместно разработанный комплекс по когерентной и волоконной оптике был поставлен в Нигерию (Федеральный государственный университет, г. Минна, стоимость контракта 50 тыс. долл. США).

В 2011 г. было осуществлено тиражирование идентификатора дифракционных структур с кодирующими элементами (10 шт.), которые были поставлены в Департамент государственных знаков Министерства финансов Республики Беларусь.

В 2014 г. были разработаны оригинальные установки для экспериментального тура Международной олимпиады по физике в рамках международного контракта с Республиканским государственным казенным предприятием «Республиканский научно-практический центр «Дарын» Министерства просвещения Республики Казахстан (400 установок на сумму 170 тыс. долл. США).

Выпуск люминесцентного волокна с поляризационно-контролируемым чередованием цвета свечения (ВПКЧЦС) организован на базе ОАО «Светлогорск Химволокно». Изготовление и выпуск документной бумаги с ВПКЧЦС осуществлен на УП «Бумажная фабрика» Гознака. При объеме выпуска бумаги 1500 т/г экономический эффект от внедрения составляет 450 тыс. долл. США в год.

Созданный по заданию «Разработать и внедрить аппаратно-программный комплекс цифровой диагностики для объективной оценки показателей голографических элементов защиты» ГНТП «Идентификация» внедрен в производственный процесс ЗАО «Голографическая индустрия» и позволил снизить уровень брака выпускаемой продукции.

ВЫСТАВКИ И НАГРАДЫ

Разработка «Лазер на иттрий-алюминиевом гранате для специального практикума по лазерной физике и нелинейной оптике» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, И. Н. Агишев) удостоена серебряной медали конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на Петербургской технической ярмарке 2012 г.

Разработка «Учебно-научный комплекс по когерентной оптике, голографии, волоконно-оптическим системам передачи информации» (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Д. В. Горбач, И. Н. Агишев) удостоена серебряной медали конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на Петербургской технической ярмарке 2013 г.

Разработка «Фотосенсибилизатор нового поколения для фотодинамической терапии онкозаболеваний» (Е. С. Воропай, А. А. Луговский, Л. С. Ляшенко, М. П. Самцов, А. П. Луговский) получила диплом 1-й степени с вручением золотой медали на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на Петербургской технической ярмарке 2014 г.

Разработка «Лекарственное средство на основе наносомального сенсибилизатора нового поколения для фотодинамической терапии новообразований с активацией светом ближнего ИК-диапазона» (Е. С. Воропай, А. А. Луговский, Л. С. Ляшенко, А. П. Луговский) получила золотую медаль конкурса «Лучший инновационный проект в области: наносистемы, наноустройства, наноматериалы, нанотехнологии» на Петербургской технической ярмарке 2014 г.

Разработка «Учебно-исследовательский комплекс по лазерной физике и нелинейной оптике», включающая модульный лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации и исследовательский комплекс на основе лазера с диодной накачкой (А. Л. Толстик, Е. А. Мельникова, Д. В. Горбач, И. Н. Агишев), удостоена серебряной медали конкурса «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на Петербургской технической ярмарке 2014 г.

Разработка «Люминесцентная метка ценных бумаг со скрытыми степенями защиты и приборы для ее экспресс-идентификации» (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. И. Серафимович) отмечена дипломом

1-й степени с вручением золотой медали на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на Петербургской технической ярмарке 2016 г.

Разработка «Лазерный видео-микроспектрометрический комплекс» (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. И. Серафимович) отмечена дипломом 1-й степени с вручением золотой медали в номинации «Лучший инновационный проект в области приборостроения и отечественной элементной базы» на Петербургской технической ярмарке 2016 г.

Разработка «Фотоактивируемый инфракрасным светом наноструктурированный антимикробный препарат» (Е. С. Воропай, А. А. Луговский, Л. С. Ляшенко, М. П. Самцов, А. П. Луговский) удостоена серебряной медали на Петербургской технической ярмарке 2018 г.

Разработка «Научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами» отмечена серебряной медалью в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 2020 г.

Разработка «Компактный электронный блок времякоррелированного счета фотонов в диапазоне 0,1 нс – 100 мкс» (Е. С. Воропай, Ф. А. Ермалицкий, А. Е. Радько, М. П. Самцов) получила серебряную медаль на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 2022 г.

Разработка «Научно-учебный лабораторный комплекс по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов» (Е. А. Мельникова, А. Л. Толстик, Д. В. Горбач, И. Н. Агишев) получила серебряную медаль на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 2022 г.

Разработка «Лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр» (Е. С. Воропай, И. М. Гулис, А. П. Зажогин, А. А. Кирсанов, А. Е. Радько, Д. С. Тарасов, М. П. Самцов, К. А. Шевченко) получила серебряную медаль на конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 2022 г.

Разработка «Модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов» (А. Л. Толстик, И. Н. Агишев, Д. В. Горбач, Е. А. Мельникова) отмечена серебряной медалью в рамках НИ-ТЕСН и Петербургской технической ярмарки 2023 г.

**ОТРУДНИКИ
КАФЕДРЫ**

Алексей Леонидович Толстик — заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии, профессор, доктор физико-математических наук, лауреат премии НАН Беларуси и премии им. А. Н. Севченко, заслуженный работник БГУ. Родился в 1959 г. в г. Минске. В 1981 г. окончил физический факультет БГУ и с того времени работает на кафедре лазерной физики и спектроскопии. С 1997 по 2010 г. — заместитель декана по научной работе, с 2010 по 2017 г. — проректор по учебной работе, с 2018 г. — заведующий кафедрой. В 1987 г. защитил кандидатскую, в 2003 г. — докторскую диссертацию, в 1992 г. присвоено ученое звание доцента, в 2007 г. — профессора.



А. Л. Толстик — специалист в области динамической голографии и нелинейной оптики, сингулярной оптики и самоорганизации в нелинейно-оптических системах, голографических технологий защиты ценных бумаг и документов, лазерно-оптического и научно-учебного приборостроения. Создал научное направление «сингулярная динамическая голография», которая использует в качестве информационных параметров топологический заряд и поляризацию светового пучка, разработал теорию многоволновых процессов преобразования световых полей динамическими голограммами. Под его руководством созданы принципиально новые средства контроля голографических элементов и идентификации кодограмм, используемые для защиты от подделки ценных бумаг и документов; разработан комплекс лазерно-оптического оборудования, применяемого в учебном процессе и научных исследованиях университетов нашей республики и зарубежных стран; внедрены в учебный процесс новые практикумы по оптической обработке информации, волоконной оптике и нанофотонике;



Коллектив кафедры

проведена модернизация спецпрактикумов по лазерной физике, когерентной оптике и голографии. Разработал и читает курсы лекций «Нелинейная оптика», «Лазерная физика», «Оптическая обработка информации».

Евгений Семенович Воропай — профессор, доктор физико-математических наук. Родился в 1944 г. в д. Тристенец Узденского района Минской области. Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии в области науки и техники, премии им. А. Н. Севченко, заслуженный работник БГУ.

В 1966 г. Евгений Семенович окончил БГУ и был распределен в аспирантуру Института физики АН БССР. В 1967 г. переведен в БГУ на кафедру общей физики, где работал до 1978 г. В 1978 г. перешел на работу в НИИ ПФП, где работал заведующим лабораторией спектроскопии до 1997 г. С 1997 по 2018 г. заведовал кафедрой лазерной физики и спектроскопии, а с 2018 является профессором кафедры. В 1973 г. защитил кандидатскую, в 1992 г. — докторскую диссертацию. В 1994 г. ему присвоено звание профессора.

Специалист в области молекулярной оптики и люминесценции, разработки научного и научно-учебного оборудования. Под его руководством создан широкий спектр оптического и спектрального оборудования, используемого в университетах республики. В последние годы развивает научное направление в области оптики, лазерной физики и спектроскопии, ориентированное на исследование взаимосвязи спектрально-люминесцентных характеристик со структурными особенностями сложных молекулярных систем и разработку на этой основе молекулярных структур для определенных приложений (лазерной физики, медицины), а также методов и аппаратуры для изучения молекулярных систем и комплексов. Разработал и читает курсы лекций «Оптика», «Оптика и оптические системы», «Лазеры в медицине и лазерные технологии», «Современные лазерные технологии».



Елена Александровна Мельникова — профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат премии им. А. Н. Севченко, заслуженный работник БГУ. Родилась в 1965 г. в г. Минске. В 1988 г. окончила физический факультет БГУ и с тех пор работает на кафедре лазерной физики и спектроскопии. В 2001 г. защитила кандидатскую, в 2023 г. — докторскую диссертацию. В 2006 г. присвоено ученое звание доцента. Круг научных интересов Е. А. Мельниковой: электрооптика ЖК, оптическая обработка и передача информации, нелинейная и сингулярная оптика, голография. Разработала и читает курсы лекций «Когерентная оптика и голография», «Оптика анизотропных сред», «Оптика полимеров и жидких кристаллов», «Жидкие кристаллы и полимеры в фотонике», «Оптика и оптические системы». Ведет лабораторные занятия в рамках общих практикумов «Физика лазеров» и «Введение в физику лазеров» для студентов физического факультета и спецпрактикума «Когерентная оптика и голография» для студентов кафедры. С 2018 г. является научным руководителем межкафедральной студенческой научно-исследовательской лаборатории (СНИЛ) «Нелинейная динамика сложных систем».





Игорь Вячеславович Сташкевич — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук, доцент. Родился в 1958 г. в д. Рукшеницы Ушачского района Витебской области. В 1982 г. окончил БГУ. С этого времени работает на кафедре лазерной физики и спектроскопии. В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1990 г. получил ученое звание доцента. Область научных интересов: оптика ЖК, оптическая голография и растровая оптика. Разработал и читает общий

курс «Физика лазеров» и спецкурсы «Современные лазерные системы. Расчет оптико-лазерных систем», «Волоконная оптика», «Modern laser systems and their applications», «General introduction in Solid State Lighting». Ведет лабораторные занятия в рамках общего практикума «Физика лазеров» для студентов физического факультета и спецпрактикума «Волоконная оптика» для студентов кафедры.

Дмитрий Владиславович Горбач — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук, доцент. Родился в 1978 г. в г. Иваново (Россия). В 2000 г. окончил физический факультет БГУ, в 2001 г. — магистратуру, в 2018 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 2021 г. присвоено ученое звание доцента.



Работал в должности ассистента кафедры лазерной физики и спектроскопии, в той же должности на кафедре общей физики, старшим преподавателем кафедры лазерной физики и спектроскопии. С 2019 г. — доцент кафедры.

Д. В. Горбач читает лекции для студентов кафедры спектроскопии по курсам специализаций «Лазеры в медицине и лазерные технологии», «Современные лазерные технологии», «Оптика анизотропных сред», «Нанопотоника», «Современные приложения нанопотоники»; спецкурсы для магистрантов «Лазерная обработка материалов», «Спектроскопия и диагностика нано- и микрообъектов»; спецкурсы для иностранных магистрантов «Optical and Laser Instrument Engineering»; проводит лабораторные занятия в рамках общих практикумов «Спектроско-

пия наноструктур» для студентов физического факультета, «Оптика» для студентов химического и физического факультетов; проводит занятия лаборатории специализации для студентов кафедры «Введение в физику лазеров», «Физика лазеров и нелинейная оптика», «Оптическая обработка информации», «Нанопотоника»; лаборатории специализации для магистрантов «Фотоника нано- и микрообъектов»; лаборатории специализации для иностранных магистрантов «Contemporary Laser Systems».

Людмила Сергеевна Ляшенко — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук, доцент, лауреат премии НАН Беларуси им. В. Ф. Купревича для студентов (2007), обладательница стипендии Президента Республики Беларусь аспирантам (2010).

Родилась в 1985 г. в г. Минске. В 2007 г. окончила физический факультет БГУ, в 2008 г. — магистратуру, в 2011 г. — аспирантуру. В 2011 г. защитила кандидатскую диссертацию и работала в Институте прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко. С 2012 г. — преподаватель, а затем старший преподаватель в Командно-инженерном институте МЧС Республики Беларусь, с 2014 г. — доцент кафедры общей физики физического факультета БГУ, с 2016 г. — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии. С 2019 по 2022 г. — заместитель декана по учебно-воспитательной работе, с 2022 г. — директор Совместного института БГУ и Даляньского политехнического университета, по совместительству доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии.



Основные научные интересы Л. С. Ляшенко: спектроскопия молекулярных систем и комплексов; взаимодействие лазерного излучения с биоструктурами; фотоника молекул органических соединений в растворах и биотканях. Результаты исследований фотофизических свойств трикарбоцианиновых красителей в растворах и в целлюлозе использованы при разработке и серийном производстве флуоресцентных инфракрасных меток для повышения степени защиты ценных бумаг и документов. Разработала и читает курсы лекций по молекулярной спектроскопии и люминесценции.

Ксения Федоровна Ермалицкая — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, кандидат физико-математических наук, доцент.



Родилась в 1984 г. в г. Минске. В 2006 г. окончила физический факультет БГУ, через год — магистратуру, в 2010 г. — аспирантуру, защитила кандидатскую диссертацию. В 2013 г. присвоено ученое звание доцента. Лауреат специального фонда Президента Республики Беларусь, лауреат премии им. А. Н. Севченко.

С 2005 г. работает на кафедре лазерной физики и спектроскопии, с 2011 г. — заведующая НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии, с 2018 г. — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ.

Ксения Федоровна разработала и читает лекции по курсам «Основы спектроскопии и спектрального анализа», «Спектроскопия наноструктур», «Лазерная обработка материалов», «Теория и техника спектроскопии», «Методы оптической спектроскопии наноструктур»; ведет занятия по лабораториям специализации: «Экспериментальная спектроскопия», «Спектральный анализ», «Лазерная спектроскопия». С 2020 г. проводит занятия на английском языке для магистрантов из ОАЭ и КНР, читает курсы лекций «Optoelectronics», «Laser Spectroscopy», «Laser Diagnostics of materials», «Theory and technique of spectroscopy».

Область научных интересов: атомная и лазерная спектроскопия, спектральный анализ, оптоэлектроника, лазерные технологии. Проводит совместные научные исследования с Институтом истории НАН Беларуси, Национальным историческим музеем, историческим факультетом БГУ по элементному анализу артефактов железного века и Средневековья.



Дмитрий Сергеевич Тарасов — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, старший научный сотрудник лаборатории спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко, кандидат физико-математических наук, доцент. Научные достижения отмечены стипендией Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым (2022).

Родился в 1987 г. в г. Минске. В 2010 г. окончил физический факультет БГУ и был распре-

делен в лабораторию спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко. В 2011 г. окончил магистратуру, в 2014 г. — аспирантуру. В 2019 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 2022 г. присвоено ученое звание доцента. Начал совмещать научную деятельность с преподаванием на кафедре лазерной физики и спектроскопии. Читает курсы лекций по люминесценции, молекулярной спектроскопии, автоматизации оптических измерений, спектроскопии наноструктур. Область научных интересов связана с исследованием фотофизических свойств индотрикарбоцианиновых красителей и разработкой на их основе фотосенсибилизаторов для ФДТ онкологических заболеваний.

Виктория Викторовна Ковгар — доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, научный сотрудник центра «Нелинейная оптика и активированные материалы» Института физики НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук, лауреат премии Специального фонда Президента Республики Беларусь по социальной поддержке одаренных учащихся и студентов, лауреат премии им. академика Н. А. Борисевича для молодых ученых Института физики НАН Беларуси.



Родилась в 1987 г. в д. Луговая Слобода Минского района. В 2010 г. окончила физический факультет БГУ и поступила в магистратуру Института подготовки научных кадров НАН Беларуси. В 2014 г. окончила аспирантуру Института физики НАН Беларуси. В 2023 г. защитила кандидатскую диссертацию. Читает курсы лекций «Основы спектроскопии», «Молекулярная спектроскопия», «Основы спектроскопии и спектрального анализа». Основное направление научной работы: оптика и спектроскопия активированных редкоземельными ионами оксидных стекол, стеклокерамик, пленок и порошков, полученных из расплава и раствора.

Иван Геннадьевич Даденков родился в 1997 г. в г. Минске, в 2020 г. окончил физический факультет, а в 2021 г. — магистратуру БГУ. За время обучения в магистратуре стал лауреатом Республиканского конкурса научных работ студентов и магистрантов в секции «Физика». Проходил четырехмесячную стажировку



в Гетебергском университете (Швеция) по программе Erasmus + . После окончания магистратуры поступил в аспирантуру БГУ по тематике, связанной с фотоиндуцированными процессами и записью динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах. С 2018 г. является сотрудником НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии, с 2023 г. по совместительству — ассистентом кафедры лазерной физики и спектроскопии. В сферу научных интересов входят голография, кристаллооптика, нелинейная оптика.

За время обучения в университете стал автором семи статей в журналах, входящих в перечень ВАК, принимал участие в девяти международных конференциях в Беларуси и России.

Евгений Васильевич Ивакин — главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук. Родился в 1941 г. в г. Чита (Россия). В 1965 г. окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана и по распределению



работал в лаборатории перспективных разработок в Минске. С 1967 г. — сотрудник Института физики АН БССР. С 2004 г. по 2008 г. работал в должности заведующего лабораторией оптической голографии, по 2018 г. — главный научный сотрудник Института физика им. Б. И. Степанова НАН Беларуси. С 2019 г. работает на кафедре в НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии. В 1973 г. защитил кандидатскую, в 1985 г. — докторскую диссертацию. В 1982 г. удостоен звания лауреата государственной премии СССР за цикл работ «Физические основы динамической голографии и новые методы преобразования пространственной структуры световых пучков». В 2009 г. награжден медалью Ю. Н. Денисюка Оптического общества им. Д. С. Рождественского.

Область научных интересов Евгения Васильевича: лазерная физика, когерентная и нелинейная оптика, материаловедение. Под его руководством разработаны и применены методы пространственно-модуляционной спектроскопии (метод динамических решеток) в изучении свойств современных материалов, таких как синтетические алмазы и алмазы, выращенные методом осаждения из паровой фазы, новых синтетических и лазерных материалов. С помощью метода высокочастотных динамических решеток впервые количественно оценен

эффект миграции энергии возбуждения в твердотельных лазерных материалах. Предложил оригинальную методику измерения времени жизни верхнего лазерного уровня на основе записи динамических голограмм, количественно оценил влияние примесей на теплопроводность и термоэлектрическую добротность тонкопленочных термоэлектриков на основе теллурида свинца. Предложил методику использования эталона температуропроводности для обеспечения метрологического контроля материалов в широком диапазоне значений температуропроводности.

За время работы в Институте физики НАН Беларуси и БГУ опубликовал более 110 статей в республиканских и международных научных журналах. Под его руководством защищены четыре кандидатские диссертации.

Александр Александрович Кирсанов — научный сотрудник НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии. Родился в 1948 г. в г. Псков (Россия). В 1971 г. окончил факультет радиофизики БГУ. Работает на кафедре с 2017 г. Специалист высокого уровня, является автором 41 научной публикации, в том числе в иностранных научных изданиях, более 10 авторских свидетельств.

Александр Александрович принимал участие в выполнении НИОКР по заданию «Разработать и изготовить универсальный лазерный комплекс для изучения процессов получения и контроля состава многокомпонентных функциональных материалов методами атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии». Комплекс внедрен в лабораторный практикум.

Интересуется современными разработками спектральных приборов, достижениями в области спектрального анализа, лазерной физики, оптоэлектроники, приборостроения. Принимает активное участие в работе кафедры, консультирует студентов и магистрантов при выполнении ими курсовых и дипломных работ.



Нонна Анатольевна Павловская — научный сотрудник НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии. Родилась в 1966 г. в г. Минске. Закончила физический факультет БГУ. С 1988 г. по 2001 г. работала в лаборатории спектроскопии НИИ ПФП им. А. Н. Севченко, с 2001 г. — на кафедре лазерной физики и спектроскопии.



Принимала участие в разработке и создании учебно-научного универсального лазерного комплекса для изучения процессов получения и контроля состава многокомпонентных функциональных материалов методами лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии. Комплекс внедрен в лабораторный практикум.

Нонна Анатольевна сопровождает организацию и проведение научных разработок на кафедре в рамках кафедральной НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии.



Екатерина Петровна Пантелеева родилась в 2000 г. в г. Калинковичи Гомельской области. В 2022 г. с отличием окончила физический факультет БГУ. В 2023 г. защитила магистерскую диссертацию. С 2020 г. работала в должности стажера младшего научного сотрудника, с 2023 г. переведена на должность младшего научного сотрудника, аспирантка БГУ.

За достижение высоких результатов в учебе и высоких показателей в научно-исследовательской деятельности назначена стипендия им. Максима Танка (2022). Лауреат гранта *Huawei* (2022), победитель конкурса «Лучший выпускник БГУ» (2022). Область научных интересов: оптика ЖК, разработка волноводных и дифракционных ЖК-элементов для управления лазерными пучками и формирования заданных структур световых полей.

Игорь Николаевич Агишев — заведующий учебной лабораторией кафедры лазерной физики и спектроскопии.

Работает в БГУ с 1989 г. Сфера научных интересов: динамическая голография и нелинейная оптика, оптическое и лазерное приборостроение. Ответственный исполнитель по заданиям ГНТП «Лазерные системы», «Идентификация», отраслевых научно-технических программ «Учебно-научный комплекс», «Защита документов», «Оптотех», «Эталоны и научные приборы», совместно с коллективом сотрудников участвовал в проектах БРФФИ. При его непосредственном участии разработана базовая модель лазера на иттрий-алюминиевом

гранате для лабораторного практикума по лазерной физике и нелинейной оптике, собран и внедрен в учебный процесс модульный научно-учебный лазерный комплекс с перестраиваемыми спектральными характеристиками генерации, создан научно-учебный лазерный лабораторный комплекс по оптическому манипулированию микрообъектами, разработан модульный нелинейно-оптический лазерный комплекс по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов. На Петербургских технических ярмарках три разработки отмечены серебряными медалями в номинации «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года».



По результатам исследований И. Н. Агишев опубликовал более 40 научных работ, получено 2 патента Республики Беларусь. Лауреат премии им. А. Н. Севченко в номинации «Образование» за комплекс учебного оборудования по лазерной физике (2012), награжден Почетной грамотой Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь.

На протяжении нескольких лет являлся секретарем и более 10 лет работает в группе сопровождения НТС подпрограммы «Научно-учебное оборудование» ГНТП «Эталоны и научные приборы», ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование», осуществляет научно-организационное сопровождение и координацию работ. Ряд разработок подпрограммы нашли отражение в учебном пособии «Физика лазеров и нелинейная оптика. Лабораторный практикум».

Светлана Геннадьевна Берлинская — ведущий специалист по обеспечению учебного процесса. Работает в БГУ с 1988 г.

Обеспечивает координацию и методическое руководство ведения делопроизводства и другой организационной деятельности на кафедре в соответствии с утвержденной номенклатурой, осуществляет контроль по заполнению сотрудниками кафедры нормативных докумен-





тов и иной отчетной документации. Оформляет текущую документацию кафедры.

Еннадий Дмитриевич Василенок — ведущий инженер-электроник. В 1982 г. окончил физический факультет БГУ. Работает в БГУ с 1989 г. Обслуживает и модернизирует практикум «Люминесценция» для студентов II – IV курсов, обеспечивает работу оборудования практикума «Молекулярная спектроскопия», оказывает помощь студентам, магистрантам в выполнении

курсовых и дипломных работ, помогает в осуществлении учебного процесса на кафедре.

Сфера научных интересов: приборостроение, в том числе оптическое и лазерное. По результатам работы получено семь патентов.

Наталья Павловна Вилейшикова — ведущий инженер.

В 1982 г. окончила физический факультет БГУ. Работает в университете с 1976 г. Обслуживает практикум «Молекулярная спектроскопия» для студентов III и IV курсов, «Молекулярный спектральный анализ» для студентов V курса, обеспечивает работу на спектральном оборудовании, входящему в состав Центра коллективного пользования.



Оказывает помощь студентам, магистрам и аспирантам кафедры в овладении техническими средствами обучения и проведении экспериментальных измерений на имеющемся в лаборатории оборудовании.

Нелли Карловна Высоцкая — ведущий специалист по обеспечению учебного процесса. В 1991 г. окончила Белорусский технологический институт по специальности «инженер-химик-технолог». С 1998 г. работала в БГУ специалистом ректората, в 2018 г. перешла на кафедру лазерной физики и спектроскопии.



Обеспечивает учебный процесс по лабораторным практикумам «Введение в физику лазеров», «Физика лазеров и нелинейная оптика», осуществляет методическое сопровождение

дение лабораторного физического практикума. Участвовала в работе Государственного экспертного совета № 5 «Фотоника, опто-, микроэлектроника, радиоэлектроника и приборостроение» (секретарь). Принимала участие в разработке, создании и внедрении в учебный процесс научно-учебного комплекса по оптическому манипулированию микрообъектами, научно-учебного комплекса по нелинейной оптике фемтосекундных импульсов, модульного нелинейно-оптического лазерного комплекса по исследованию спектральной перестройки частоты на основе параметрических процессов.

Владимир Станиславович Жабо — ведущий инженер-электроник. Окончил факультет автоматизации управления Минского радиотехнического института (сейчас — БГУИР). На протяжении трудовой деятельности занимался автоматизацией технологических и информационных процессов в различных отраслях.

Работает в БГУ с 2017 г. Проводит материально-техническое обеспечение научной и учебной деятельности кафедры, использует свой богатый организационный опыт и разносторонние знания для повышения уровня информационно-технического обеспечения работы кафедры, решает широкий круг задач, связанных с хозяйственной деятельностью и ведению договоров.



Людмила Николаевна Коваленко — ведущий специалист по обеспечению учебного процесса. В 1975 г. окончила Минский государственный педагогический институт иностранных языков. Работает на кафедре лазерной физики и спектроскопии физического факультета с 1982 г. Проводила информационный поиск, оформление отчетов, выполняла переводы специальной и научно-технической литературы, занималась информационно-аналитическим обеспечением учебно-методической деятельности, переводом методических пособий на английский язык, принимала участие в работе, связанной с приемом и подготовкой иностранных стажеров и специалистов. Привлекалась к работе отдела выставок и маркетинга БГУ, занимаясь переводом и распространением рекламных материалов, участвовала в мероприятиях отдела по приему приглашен-



ных гостей и делегаций. С 1983 по 2019 г. была секретарем журнала «Вестник БГУ. Серия 1: Физика. Математика. Информатика», занималась подготовкой, реферированием и редактированием текстов при оформлении специальных номеров журнала, предназначенных для иностранных читателей. С 2000 по 2023 г. — секретарь государственной экзаменационной комиссии на факультете.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ	7
Организационный период	9
Период становления и развития кафедры	17
РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ В XXI в.	53
Атомно-эмиссионная спектроскопия	55
Спектрально-люминесцентные характеристики молекулярных систем, разработка методик их использования в медицине	64
Спектры двухфотонновозбуждаемой флуоресценции (ДФВФ)	64
Поляризация двухфотонновозбуждаемой флуоресценции	65
Препараты для биомедицинских применений	72
Динамическая голография	84
Многоволновые взаимодействия в резонансных средах на основе записи динамических голограмм	84
Сингулярная динамическая голография	96
Динамическая голография и бесконтактная диагностика функциональных материалов	102
Жидкие кристаллы в системах управления лазерными пучками и формирования заданных структур световых полей	110
ДОСТИЖЕНИЯ КАФЕДРЫ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ЛЕТ	125
Основные направления научных исследований	127
Проекты белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований	145
Задания на 2021 – 2025 гг.	151
Основные научно-технические разработки	152
Внедрение в производство	163
Выставки и награды	165
СОТРУДНИКИ КАФЕДРЫ	167

Научно-популярное издание

Воропай Евгений Семенович

Толстик Алексей Леонидович

**СПЕКТРОСКОПИЯ
И ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА В БГУ
КАФЕДРЕ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ
И СПЕКТРОСКОПИИ 70 ЛЕТ**

Редактор *Е. Н. Кравченко*

Художник обложки *А. А. Рабкевич*

Технический редактор *В. П. Явуз*

Компьютерная верстка *Е. В. Севрук*

Корректор *А. Г. Панченков*

Подписано в печать 09.09.2024. Формат 60×84/16. Бумага мелованная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 14,64.

Тираж 50 экз. Заказ 559.

Белорусский государственный университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/270 от 03.04.2014.

Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.

Республиканское унитарное предприятие

«Информационно-вычислительный центр

Министерства финансов Республики Беларусь».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/41 от 29.01.2014.

Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.