

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

XXX Международная конференция
студентов, аспирантов и молодых ученых
по фундаментальным наукам



Международный
молодежный научный форум

“ЛОМОНОСОВ–2023”

Секция **“ФИЗИКА”**

Подсекция
“ОПТИКА”,

Сборник тезисов докладов

МОСКВА
Физический факультет МГУ
2023

XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2023». Секция «Физика». Сборник тезисов. — М. Физический факультет МГУ, 2023, 1052 с.

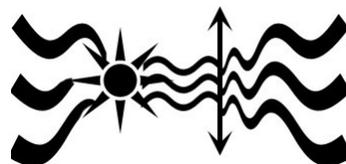
ISBN 978-5-8279-0255-3

Секция «Физика» включает следующие подсекции

1. Акустика
2. Астрофизика
3. Атомная и ядерная физика
4. Биофизика
5. Геофизика
6. Математика и Информатика
7. Математическое моделирование
8. Медицинская физика
9. Молекулярная физика
10. Нелинейная оптика
11. Оптика
12. Радиофизика
13. Сверхпроводящие и электронные свойства твердых тел
14. Твердотельная наноэлектроника
15. Теоретическая физика
16. Физика космоса
17. Физика магнитных явлений
18. Физика твердого тела
19. Школа МГУ «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина»:
 - Квантовые технологии
 - Фотонные технологии
 - Цифровая медицина

ISBN 978-5-8279-0255-3

© Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023 г.



Лазерный профилометр колесных пар	442
Аринушкина К.Г. ¹	442
Экспресс-контроль состояния жидких сред с использованием рефракции	444
Бажанова В.А.	444
Определение ориентировки и построение полюсных фигур монокристаллов по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света (на примере алмаза)	445
Богданова Л.И.	445
Температурная зависимость люминесценции смешанных комплексов f-элементов с N-гетероциклическими лигандами	447
Божко А. А.	447
Влияние встроенных пьезоэлектрических полей на спектры фото- и электролюминесценции светодиодных гетероструктур со множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$	448
Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П.	448
Усовершенствование устройства для исследования цветовых параметров объектов	449
Гафуров В.Р.	449
Высокочастотный усилитель яркости на парах хлорида марганца с емкостным типом возбуждения	451
Гембух П.И., Шиянов Д.В., Тригуб М.В.	451
Экспериментальная установка для электронной регистрации и оптич. восстановления голограмм.	453
Горанская С.А.	453
Исследование влияния процесса солегирования ионами Yb^{3+} на ап-конверсионную люминесценцию люминофоров $\text{SrF}_2:\text{Er}$ при возбуждении лазерным излучением 1.5 мкм области спектра	455
Гущин С.В., ¹ Кузнецов С.В. ² , Ляпин А.А. ¹ , Пройдакова В.Ю. ² , Рябочкина П.А. ¹ , Федоров П.П. ²	455
Изменение поверхности красочного слоя фресковой живописи в результате отбора микропроб образца с помощью метода лазерной абляции	457
Дедова А.Е. [*] , Кононова Е.М. ^{**} , Анисимова Т.И. ^{**} , Брандт Н.Н. [*] , Балахнина И.А. [*]	457
Определение лекарственного препарата «метотрексат» в плазме крови человека методом гигантского комбинационного рассеяния света	458
Демишкевич Е.А., ^{1,2} Зюбин А.Ю., ¹ Евтифеев Д.О., ¹ Самусев И.Г., ¹	458
Квантовые ямы AlGaInAs для спектрального диапазона 1300-1550 нм	460
Дибольский Р.В. ¹ , Туркин А.Н. ¹ , Мармалюк А.А. ²	460
Модификация оптического фильтра на основе рельефной структуры переменной глубины	461
Долгополов И.С.	461
Эффекты быстрого и медленного света при распространении chirпированных фемтосекундных лазерных импульсов в гиперболических метаматериалах	462
Доценко А.А., Ремизов О.А. ¹	462
Создание уязвимостей в системах квантового распределения ключей в результате атаки импульсным лазером	464
Жлуктова И.В. ¹ , Ружицкая Д.Д. ^{2,3} , Поносова А.А. ^{1,2,3} , Камынин В.А. ¹ , Макаров В.В. ^{2,3,4}	464
Multicomponent metal Iron Age artefacts analysis by laser induced breakdown spectroscopy	465
Ivanova P.A.	465
Трансформация квадратурно-модулированного сигнала в волоконно-оптической линии связи с полупроводниковыми усилителями	467
Илюшин П.Я.	467
Эрбиевый волоконный лазер с частотой повторения ультракоротких импульсов 300 МГц	469
Зверев А.Д. ^{1,*} , Камынин В.А. ¹ , Цветков В.Б. ¹ , Сверчков С.Е. ¹ , Вельмискин В.В. ² , Денкер Б.И. ¹ , Глушаков Ю.Г. ³ , Насибулин А.Г. ^{3,4}	469
Особенности спектрального анализа углеводородных сред	471
Калашников В. А.	471
Исследование фотоэлектрических и фотофизических свойств гибридной структуры на основе квантовых точек $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ и многослойных нанолент графена	473
Карамышева С.П., Резник И.А., Тимкина Ю.А., Рамазанова В.Р., Орлова А.О.	473
Использование активного элемента с индукционным нагревателем для генерации излучения на парах натрия	474
Карасев Н.В., Суханов В.Б., Тригуб М.В.	474
Исследование параметров плазмы импульсного искрового разряда методами цифровой голографической интерферометрии	475
Кожевникова А.М., Алексеенко И.В.	475

Исследование влияния флуктуаций потенциала в твердых растворах диэлектрических кристаллов на релаксацию электронных возбуждений в процессе развития сцинтилляции	477
Кондратьев И. М.	477
Reducing Laser Phase Noise for Enhanced Fidelity in Rydberg Gates.....	478
Kour Navjeet ^{1,2} , Svirsky Daniil ^{2,3} , Lomov Evgeny ³	478
Влияние характеристик растворителя на оптические свойства углеродных точек	479
Корепанова А.А.	479
Кинематическая теория рассеяния закрученных фотонов на спиральных средах с пространственной дисперсией	480
Королев П.С.	480
Исследование фрагментов фресок из храмов Великого Новгорода методом микроспектроскопии комбинационного рассеяния	480
Кочетков М.И. *, Кононова Е.М. ^{2**} , Анисимова Т.И. **, Брандт Н.Н. *, Балахнина И.А. *	480
Исследование оптических характеристик термоусадочных полиолефиновых пленок, шитых ультрафиолетовым светом	482
Кочешкова В.А., Ларина Н.А., Рябочкина П.А., Кострюков С.Г.	482
Оптические спектры терморadiационно-модифицированного политетрафторэтилена, облученного потоком ускоренных ионов ксенона	483
Кошкина О.А. ¹ , Москвитин Л.В. ²	483
Трансформация структуры фрактальных спекловых пучков структурой при их распространении в свободном пространстве.....	485
Кубанов Р.Т., Зотов А.М., Павлов Н.Н.	485
Использование генеративно-состязательных сетей для улучшения качества решения обратной задачи оптической спектроскопии.....	487
А. Д. Кудряшов ¹ , О. Э. Сарманова ¹	487
Устройство мобильного лидара на основе полупроводникового лазера для контроля концентрации твердых частиц в атмосфере	488
Куркова А.Д.	488
Исследование фотоиндуцированного нагрева наночастиц на основе эффекта комбинационного рассеяния света.....	489
Кучумов И.Д.	489
Прямая лазерная запись сегментированных брэгговских решёток в кварцевом стекле марки КВ.....	490
Лихов В.В.	490
Автоматизированное измерение динамики насыщения поглощения в двухмикронном спектральном диапазоне	491
Лобанов А.И. ^{1,2} , Филатова С.А. ¹ , Садовникова Я.Э. ² , Камынин В.А. ¹	491
Иттербиевый волоконный лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм	493
Макеева А.Р. ^{1,2,*} , Филатова С.А. ² , Камынин В.А. ² , Рыбалтовский А.А. ³	493
Измерение концентрации хлорофилла в поверхности плодов айвы по спектрам отражения	495
Манафов Рустам	495
Влияние плазменных наночастиц на люминесценцию эритрозина в пленках поливинилового спирта ..	497
Мушин Ф.Ю.	497
Разработка автоматической системы подстройки положения оси лазерного излучения для воздушного канала связи.....	499
Назарова К.С.	499
Компактный твердотельный лазер с диодной оптич. накачкой и высокой частотной стабильностью	501
Наумова В.В.	501
Применение ССД и КМОП устройств в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн ..	503
Николаева И.Н. ^{1,2} , Рогожников Г.С. ²	503
Рамановская спектроскопия для идентификации пигментов в произведениях искусства.....	504
Олейник Е.А. ¹ , Кожина Е.П. ² , Бедин С.А. ³	504
Метод матриц переноса для определения оптических свойств тонкопленочных материалов	505
Павлов А.А.	505
Изучение свойств спеклоподобных световых полей в рамках учебных модулей кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем	506
Павлов Н.Н., Короленко П.В., Тулапин Ф.А.	506
Исследование структур в оптическом диапазоне на основе метода осевой голографии Габора	507
Платонов В.В.	507
Синтез наночастиц меди методом лазерной абляции материала в жидкость	508
Путилов А.Г., Шепелев А.Е., Антипов А.А.	508
Колориметрия термоиндуцированных изменений красочных слоёв, моделирующих древнерусскую фресковую живопись	509
Пушистова А.С., Крамарев Е.Г., Кононова Е.М. [*] , Анисимова Т.И., Балахнина И.А., Брандт Н.Н.	509

Исследование спектра оптического пропускания полиэтилентерефталатной плёнки	510
Распопова С.Н. ¹ , Полуниин К.С. ²	510
Люминесцентные свойства неорганических и гибридных органо-неорганических свинцовых галогенидных перовскитов	512
Рубцова Е.Д.	512
Фотовозбуждение плоских экситонов Ванье закрученными фотонами	513
Рякин В.А.	513
Влияние стабильности питающего напряжения на параметры активных оптических систем	514
Семенов К.Ю. ^{1,2} , Васнев Н.А. ² , Тригуб М.В. ²	514
Микросферная оптическая микроскопия с достижением нанометрового разрешения	516
Сенотрусова С.А., Ахметова А.И., Яминский И.В.	516
Фототепловая спектроскопия сверхмалого поглощения органических полупроводниковых кристаллов	517
Сисина В.В.	517
Печатные перовскитные полусферические микролазеры	518
Смирнов А.А. ¹ , Полушкин А.С. ² , Погосян Т.Н. ¹ , Макаров С.В. ² , Виноградов А.В. ¹	518
Методы контроля качества диодной матрицы кремниевой пластины для телевизионных трубок	519
Соколова А.А.	519
Особенности экспресс-контроля летучих углеводородных сред и их смесей в видимом свете	521
Степаненков Г.В., Вакорина Д.В., Резников Б.К.	521
Поляризационно-чувствительный фототранзистор на основе двумерного MoS ₂	523
Степанов М.А., Гуськов А.А.	524
Отечественная лазерная керамика. Технология производства и пути дальнейшего развития	525
Тараканов Е.Д., Ульянов Я.В.	525
Широкотемпературный ферриэлектрический жидкий кристалл как квадратичная электрооптическая среда нового поколения	526
Ткаченко Т.П. ^{1,3} , Кузнецов А.В. ^{1,3} , Жукович-Гордеева А.А. ^{2,3}	526
Исследование чип-элементов на основе отечественной композитной керамики Nd ³⁺ :YAG/Cr ⁴⁺ :YAG для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой	527
Ульянов Я.В., Чешев Е.А.	527
Формирование пространственного профиля интенсивности лазерных пучков зубчатыми апозидирующими диафрагмами	529
Устинов И.М. ^{1,2} , Зималин Б.Г. ¹ , Мурылев В.В. ¹	529
Влияние предобработки спектров комбинационного рассеяния света водными растворами неорганических солей на точность диагностики водных сред с помощью искусственных нейронных сетей	529
Утегенова Л.С., Сарманова О.Е.	529
Сравнение спектров флуоресценции образцов натуральных зубов при возбуждении в УФ спектральной области	530
Фадеев И.С. и Брандт Н.Н.	530
Исследование динамики поглощения из возбуждённого состояния ⁵ I ₇ ионов гольмия в оптических волокнах на кварцевой основе	532
Фалэ А.Е. ^{1,2} , Камынин В.А. ² , Федосеев А.И. ¹ , Филатова С.А. ²	532
Влияние протонного облучения на оптические свойства монокристаллов гранатов Gd ₃ Al _x Ga _{5-x} O ₁₂ (x = 0, 1, 2, 3)	534
Федюнин Ф.Д.	534
Количественное определение хлоросомных бактериохлорофиллов на примере водоемов с аноксигенными фототрофными бактериями Беломорского региона	535
Филиппова О.А.	535
Влияние атомов галогенов на люминесцентные св-ва новых координационных соединений иона Eu ³⁺	537
Цориева А.В., Коршунов В.М., Тайдаков И.В.	537
Люминесцентные свойства фосфатов с ионной проводимостью, активированных редкоземельными элементами	538
Шабалина Е.М.	538
КР спектроскопия водного раствора α-химотрипсина при наносекундном импульсном лазерном возбуждении на длине волны 532 нм	539
Швыдя А.О., Брандт Н.Н.	539
Разработка автономного малогабаритного цифрового микроскопа с регулировкой увеличения до семидесяти крат	540
Шевченко Д.В.	540
Оптические системы формирования и коллимации излучения квантово-каскадных лазеров	542
Шепелев А.Е.1, Путилов А.Г. 1, Антипов А.А.2	542
Изготовление диэлектрических оптических волноводов, поддерживающих распространение блоховских поверхностных волн.	543
Шурубурга Г.П.	543
Спектроскопия комбинационного рассеяния обратных микроэмульсий в процессе синтеза в них наночастиц ZnS	543
Волков Р.Р., Пластинин И.В.	543

ЛАЗЕРНЫЙ ПРОФИЛОМЕТР КОЛЕСНЫХ ПАР

Аринушкина К.Г.¹

С-Пб. ГУ телекоммуникаций им. М.А.Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: k-arinushkina@mail.ru

Аннотация

В статье анализируются основные неисправности вагонов, возникающие в процессе эксплуатации на Северо-Западных железных дорогах. Неисправные поверхности катания колесных пар были определены как одна из основных проблем на раннем этапе ремонта вагонов. Проанализированы дефекты колесных пар, возникающие в процессе эксплуатации подвижного состава Северо-Западной железной дороги. Для сокращения времени остановки проходящих поездов предлагается вариант внедрения на железнодорожных путях лазерных профилометров. В ходе работы были проанализированы данные, полученные при измерениях различных профилей поверхностей грузовых вагонов, в том числе колесные пары в сравнении с эталонными профилями [2].

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, вагон, колесная пара, лазерный профилометр, дефекты поверхности катания, неисправности колесных пар.

Введение

Систематический и эффективный контроль диаметра и профиля колесных пар и межосевого расстояния является важной составляющей контроля за износом колес, возникающим в процессе эксплуатации колесных пар. Требования, предъявляемые к контрольно-измерительным приборам, включают высокую точность, надежность и простоту эксплуатации. Непрерывность процесса контроля износа требует представления результатов измерений в цифровом виде, удобном для обработки и хранения в компьютерной базе данных, позволяющей проводить анализ данных и просматривать историю износа.

Лазерный профилометр

Лазерный профилометр предназначен для измерения: высоты гребня (проката), толщины гребня, крутизны гребня, толщины бандажа, снятия и анализа полного профиля поверхности катания колеса, поддержки электронной базы данных по износу колесных пар, проведения допускового контроля и разбраковки при техническом осмотре, освидетельствовании, ремонте и формировании железнодорожных колесных пар локомотивов и моторвагонных подвижных составов. Замеры производятся непосредственно на подвижном составе, без выкатки колесных пар [1].

Структурная схема лазерного профилометра показана на рисунке 1.

Сигнал лазера оставляет на фотоматрице широкую линию, охватывающую сразу несколько точек. Лазерный луч расположен относительно матрицы вертикально, то есть вдоль ее короткой стороны. В этом случае объектов обработки изображения будет являться строка. При этом инвертированное изображение на матрице показано на рисунке 2 слева, а обработанное облако точек справа. По облаку точек, полученному на основе изображения с ПЗС-матрицы, происходит анализ профиля колеса и расчет контрольных значений.

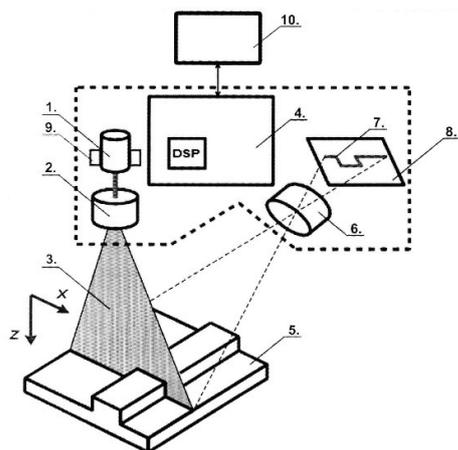


Рис. 1. Лазерный профилометр. 1 – лазерный модуль; 2 – генератор линии; 3 – плоскость лазерного излучения; 4 – контроллер на базе цифрового сигнального процессора; 5 – контролируемый объект; 6 – оптическая система фотоприемника; 7 – изображение линии зондирующего лазерного излучения на фотоприемнике; 8 – матричный фотоприемник

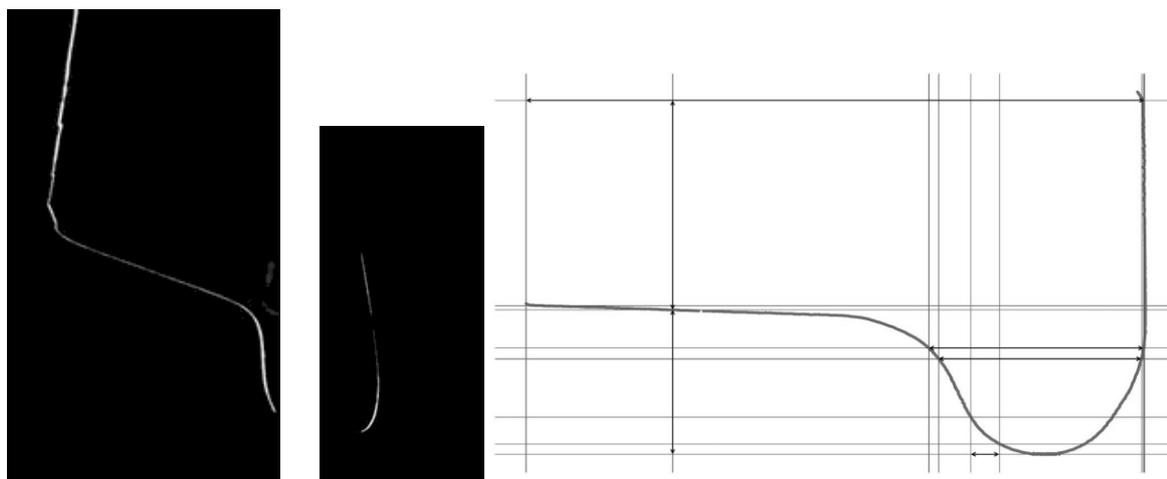


Рис. 2. Профиль колеса.

Заключение

Автоматизированная система профилометра позволяет не только делать снимки, но и передавать информацию. Это помогает оценить количество ошибок по полученным измерениям и позволяет преобразовать их в цифровые данные. В статье также представлены основные преимущества лазерного профилометра поверхности катания колесных пар и даны рекомендации по его внедрению.

Выделены существенные недостатки в работе комплекса технических измерений, действующего на Московской железной дороге, влияющие на пропускную способность станций и пунктов технического обслуживания. Выявлены основные проблемы на начальном этапе ремонта вагонов из-за выхода из строя поверхности катания колесных пар. С целью сокращения времени обработки транзитных поездов на формовочном участке рекомендовано внедрить в производство лазерный профилометр для измерения поверхности катания колесных пар.

Литература

1. Кучин, Альфред Александрович. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности / А. А. Кучин, К. А. Обрадович. - Ленинград : Машиностроение : Ленингр. отд-ние, 1981. - 197 с. : ил.; 21 см.
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 г. No.877-р

ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЖИДКИХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕФРАКЦИИ

Бажанова В.А.

С-Пб. ПУ им.Петра Великого, ИЭуТ, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vieronika.bazhanova.2003@mail.ru

В лабораториях при проведении экспериментов и на производстве при контроле технических процессов необходимо обеспечить надежный контроль состояния конденсированных сред [1, 2]. Крайне важно при исследовании любого вещества не нарушить его структуру и физические свойства. Это необходимо для дальнейшего исследования этого вещества на приборах более высокого разрешения для получения подтверждения выявленного отклонения от стандартного состояния, а также установления причины данного отклонения. Одним из решений этой задачи может быть использование рефрактометра. Благодаря рефрактометру, исследования можно проводить при различной температуре. Преимущество используемых мною рефрактометрических измерений состоит в том, что прибор не требует питание от сети, измерения можно проводить при видимом свете, исследовать большое число конденсированных сред.

Для определения состава вещества используется оптическое явление полного внутреннего отражения света в призме, контактирующей с исследуемой средой. Для этого была модернизирована конструкция рефрактометра типа Аббе [3]. На рис. 1 представлена эта оптическая конструкция, позволяющая проводить измерения показателя преломления конденсированной среды с использованием верхней и нижней призмы.

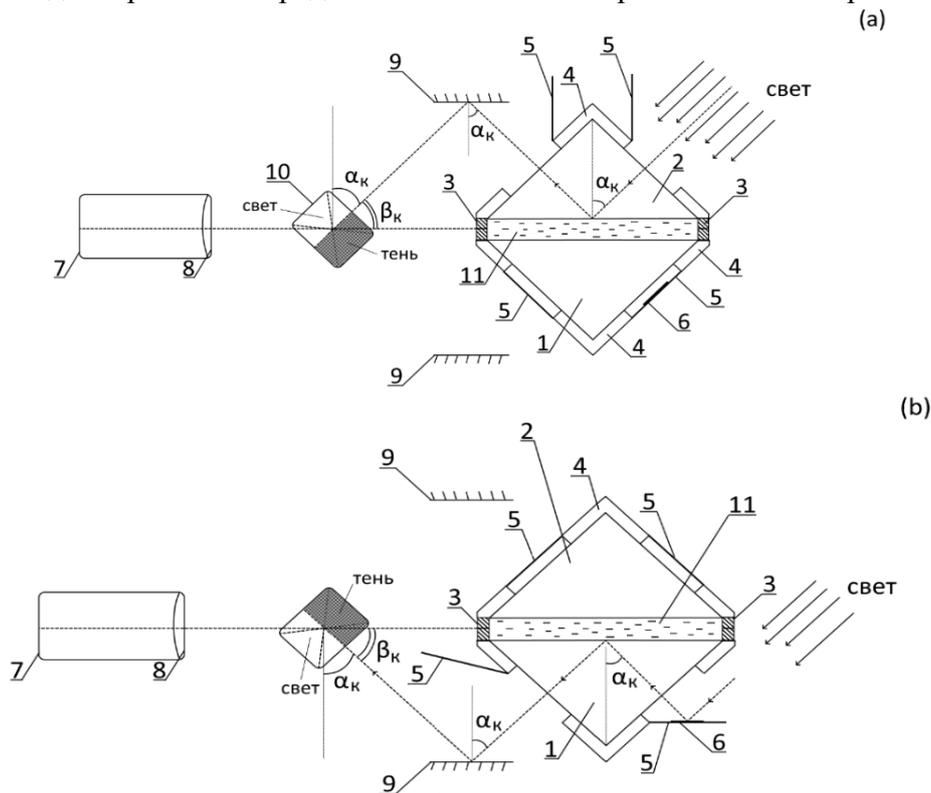


Рис.1. Измерение показателя преломления при падении света на верхнюю призму (а) и на нижнюю (б)

На рис. 2 и 3 представлены результаты измерения показателя преломления смеси двух бензинов Аи-92 и Аи-95 при $T = 24.5^{\circ}\text{C}$. Очень часто в бензин Аи-95 добавляют другие бензины (более дешевые), выдавая его за чистый бензин Аи-95 (высокого качества).

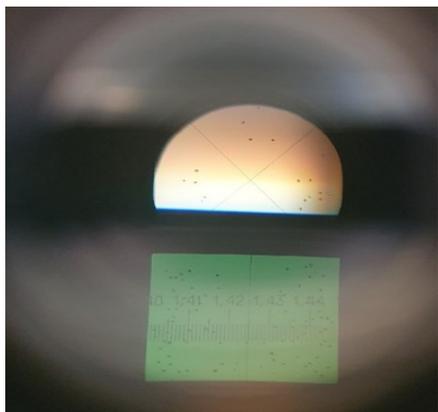


Рис. 2. Результаты измерения показателя преломления смеси двух бензинов после интенсивного перемешивания в пропорции 30% - Аи-92; 70% - Аи-95 с использованием верхней призмы

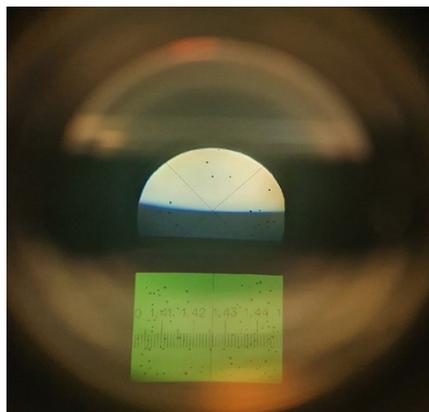


Рис. 3. Результаты измерения показателя преломления смеси двух бензинов после интенсивного перемешивания в пропорции 30% - Аи-92; 70% - Аи-95 с использованием нижней призмы

Полученный результат показывает отклонение показателя бензина Аи-95 от стандартного состояния. Этот результат удалось получить, используя менее 1 мл исследуемого бензина. Это является одним из достоинств рефрактометров. В случае использования для исследований других сред (бензин летучая среда) можно пробу этой среды далее исследовать на других приборах. Сочетание рефрактометрических измерений с определением других физических свойств исследуемого вещества позволяет анализировать сложные смеси и определять состав многих промышленных продуктов и биологических объектов на месте взятия пробы в течении времени менее 1 минуты.

Литература

1. Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. - Изд. 3-е, перераб. и доп. -Л.:Химия, 1989. – 352 с.
2. Блинникова А. А. Рефрактометрический метод в анализе лекарственных средств, концентратов, спирто-водных растворов: Учебное пособие. Издание 2-е, исправ. и доп. – Томск, 2007 – 37с.
3. Давыдов В.В., Гребеникова Н.М., Смирнов К.Я. Оптический метод контроля состояния текущих сред с низкой прозрачностью и крупными включениями. // Измерительная техника. 2019. № 6. С. 37-43.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ И ПОСТРОЕНИЕ ПОЛЮСНЫХ ФИГУР МОНОКРИСТАЛЛОВ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАСSEЯНИЯ СВЕТА (НА ПРИМЕРЕ АЛМАЗА)

Богданова Л.И.

Уральский ФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия
E-mail: bogdanovalouisa@gmail.com

Определение кристаллографической ориентации минералов актуально в рамановской упругой термобарометрии и при определении динамики роста кристаллов [1]. Преимуществами спектроскопии комбинационного рассеяния света является тот факт, что она представляет собой неразрушающий метод, не требующий пробоподготовки и простой в постобработке результатов. Измерения можно проводить на глубине порядка 1-2 мкм, что имеет большое значение в исследовании включений в образце.

Моссбрукер и Гротъон исследовали угловую зависимость интенсивности рамановского рассеяния для алмаза, уравнение которой имеет вид [2]:

$$I_s = C_1(\alpha, \beta, \gamma, \psi_i) + C_2(\alpha, \beta, \gamma, \psi_i) \sin(2\psi_s) + C_3(\alpha, \beta, \gamma, \psi_i) \cos(2\psi_s), \quad (1)$$

где I_s – интенсивность рассеянного света, C_i – коэффициенты, зависящие от углов Эйлера α, β, γ , определяющих ориентацию образца в пространстве, ψ_i, ψ_s – угол падения падающего и рассеянного света соответственно. Задача состоит в определении трех углов α, β, γ поворота относительно ZXZ осей системы координат, связанной с кристаллографической ориентацией образца. Осуществляя описанные повороты можно совместить систему координат образца с лабораторной системой координат.

В данной работе представлена методика, основанная на измерении угловой зависимости спектров комбинационного рассеяния и сопоставления результатов с выражением (1). Спектры комбинационного рассеяния были сняты в геометрии обратного рассеяния на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 Evolution с использованием объективов Olympus 50× и 100×, дифракционной решетки 1800 штр/мм, возбуждение осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 633 нм. Вращение поляризации рассеянного излучения осуществлялось с помощью анализатора, изменение угла между образцом и направлением падающей поляризации осуществлялось поворотом образца на 90°. Для анализа результатов создана компьютерная программа в среде MATLAB, основанная на определении множества оптимальных параметров α, β, γ , соответствующих уравнению (1) при измеренных экспериментально значениях интенсивности рассеянного света для двух положений образца и последующей нелинейной минимизацией, с помощью функции `fmincon`, разницы между уравнением (1) и экспериментальными данными.

$$Res = \sum (I_s^{teor} - I_s^{exp})^2 \quad (2)$$

Методика и ее программная реализация иллюстрируются на примере образцов алмаза с заданной ориентацией [100] и [111], природном монокристалле с разориентацией и синтетическом кристалле, полученном НРНТ методом, в огранке.

Полярные фигуры для ориентации [100] и [111] (рис. 1) характеризуются набором соответствующих углов Эйлера (40, 0, 0) и (46, 46, 44). В данном случае для совмещения кристаллографических ориентаций с лабораторной системой координат образцы необходимо один раз повернуть относительно оси Z на 40° и 46° градусов соответственно, что согласуется с известной ориентацией.

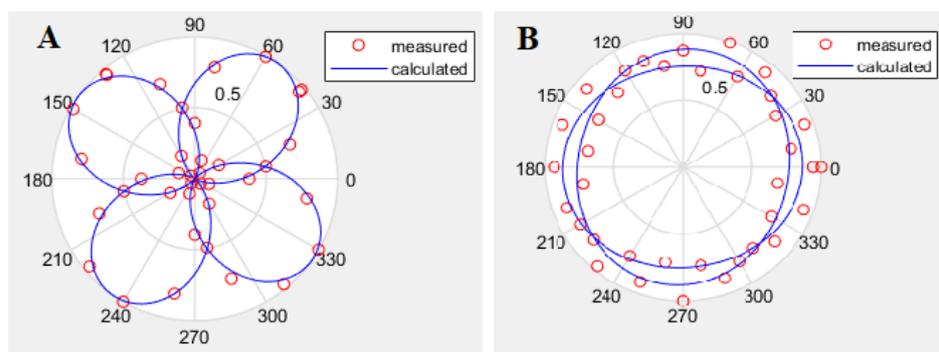


Рис. 1. А Зависимость интенсивности от угла падения рассеянного света для образца с ориентацией [100]; В Зависимость интенсивности от угла падения рассеянного света для образца с ориентацией [111]

Повторное измерение ориентации на образце [111] с объективом 50× и 100× дает значения углов (46, 46, 44) и (47, 45, 44) соответственно, что свидетельствует о воспроизводимости полученных данных.

Исследование образца природного монокристалла алмаза, с известной разориентацией в 60°, дают значения (35, 81, 64) и (55, 29, 36) для двух точек из разных областей. С помощью пакета MTEX для среды MATLAB было определено значение разориентации в 56°.

Таким образом рассчитанные значения углов Эйлера и разориентации образцов согласуются с известными данными. В дальнейшем планируется адаптация действующей программы для исследования других минералов и включений в них на основе учета мод, активных в комбинационном рассеянии, и соответствующих тензоров рассеяния.

Автор выражает благодарности к. ф.-м. н. Ю. В. Щаповой и ЦКП «Геоаналитик» за помощь в работе и проведении измерений.

Литература

1. Zhong X., Loges A., Roddatis V., John T. Measurement of crystallographic orientation of quartz crystal using Raman spectroscopy: application to entrapped inclusions // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2021. Vol. 176. P. 89.
2. Mossbrucker J., Grotjohn T.-A. Determination of local crystal orientation of diamond using polarized Raman spectra // Diamond and Related Materials. 1996. Vol. 5. P. 1333-1334.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СМЕШАННЫХ КОМПЛЕКСОВ F-ЭЛЕМЕНТОВ С N-ГЕТЕРОЦИКЛИЧЕСКИМИ ЛИГАНДАМИ

Божко А. А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: bozhko_1999@list.ru

Биметаллические комплексы европия и тербия – соединения, обладающие высокой температурной чувствительностью люминесценции при физиологических условиях. Также такие соединения имеют разные временные характеристики изменения интенсивности люминесценции при малых изменениях температуры. Эти свойства являются очень важными для создания люминесцентных датчиков и молекулярных термометров – перспективных инструментов для развития методов диагностики рака и температурных измерений очень малых объектов в биологических исследованиях [1,2]. Поэтому актуальной задачей является исследование люминесцентных характеристик данных веществ при физиологических условиях в зависимости от температуры.

Целью данной работы является исследование температурной и концентрационной зависимости спектрально-люминесцентных характеристик комплексов редкоземельных элементов с N-гетероциклическими лигандами на основе 2,2'-бипиридилдикарбоксиамида с двумя излучающими центрами (европий и тербий). В серии экспериментов изменялись концентрации европия и тербия в растворе. Растворы лиганда, гексагидрата нитрата европия и пентагидрата нитрата тербия в ацетонитриле (концентрации $2 \cdot 10^{-5}$ моль/л) смешивались в соотношениях 1:0.1:0.9; 1:0.2:0.8; ... 1:0.5:0.5; 1:0.6:0.4; ... 1:0.9:0.1.

Для регистрации спектров поглощения использовался спектрофотометр Solar RB2201. Спектры люминесценции и кинетика затухания люминесценции регистрировались на спектрометре Solar SM2203 при возбуждении светом с длиной волны 320 нм. Для поддержания необходимой температуры исследуемого раствора в диапазоне от 20 до 60 °С использовалось термостатируемое кюветное отделение. Квантовый выход люминесценции определялся методом эталонного красителя.

Было обнаружено, что спектры поглощения практически не зависят от температуры. Определены времена жизни ионов европия и тербия в растворах при различных температурах. Получены спектры возбуждения люминесценции, зависимости квантового выхода люминесценции соединений от температуры. Рассчитаны отношения интегральных интенсивностей люминесценции ионов европия и тербия в зависимости от температуры. Также рассчитан коэффициент линейной регрессии температурной зависимости для европия и тербия, характеризующий скорость изменения интенсивности

люминесценции в зависимости от температуры при разных концентрациях двух энергетических центров.

Автор выражает благодарность к.ф.-м.н., доценту физического факультета МГУ Пацаевой С.В. и к.ф.-м.н., ассистенту физического факультета МГУ Харчевой А.В. за научное руководство данной работой, а также д.х.н., с.н.с. химического факультета МГУ Борисовой Н.Е. и к.х.н., доценту химического факультета МГУ Иванову А.В. за предоставленные образцы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00103, <https://rscf.ru/project/23-22-00103/>).

Литература

1. N. Borisova, A. Ivanov, A. Kharcheva, S. Patsaeva et al. Effect of Heterocyclic Ring on LnIII Coordination, Luminescence and Extraction of Diamides of 2,2'-Bipyridyl-6,6'-Dicarboxylic Acid // *Molecules*, 2020. V. 25(1): 62

2. M. Vialtsev, A. Dalinger, V. Utochnikova et al. New approach to increase the sensitivity of Tb-Eu-based luminescent thermometer // *Phys Chem Chem Phys.*, 2020. V. 22(44), P. 25450-25454

ВЛИЯНИЕ ВСТРОЕННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА СПЕКТРЫ ФОТО- И ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GAN}$

Бурмистров Е.Р., Авакянц Л.П.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

В настоящей работе исследовано влияние встроенных пьезоэлектрических полей на спектры фото- и электролюминесценции (ЭЛ) гетероструктур с тремя и пятью квантовыми ямами (КЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GAN}$. Фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась лазером с длиной волны излучения 405 нм при смещении области возбуждения по радиусу от центра к краю кристалла. Это позволило установить неравномерное распределение встроенных пьезоэлектрических полей вдоль всей активной области гетероструктур. Шаг смещения составил 5 мм. Спектры ЭЛ получены в диапазоне токов $J = 4 - 12$ мА с шагом 2 мА. При этом напряжение на образце увеличивалось от $V = 3.1$ до 3.5 В.

На основании самосогласованного решения уравнения Шредингера и электронейтральности Пуассона рассчитана зонная диаграмма исследованных образцов. Результаты расчетов позволили связать наблюдаемые в спектрах ФЛ и ЭЛ пики с межзонными переходами основных носителей заряда в КЯ InGaN

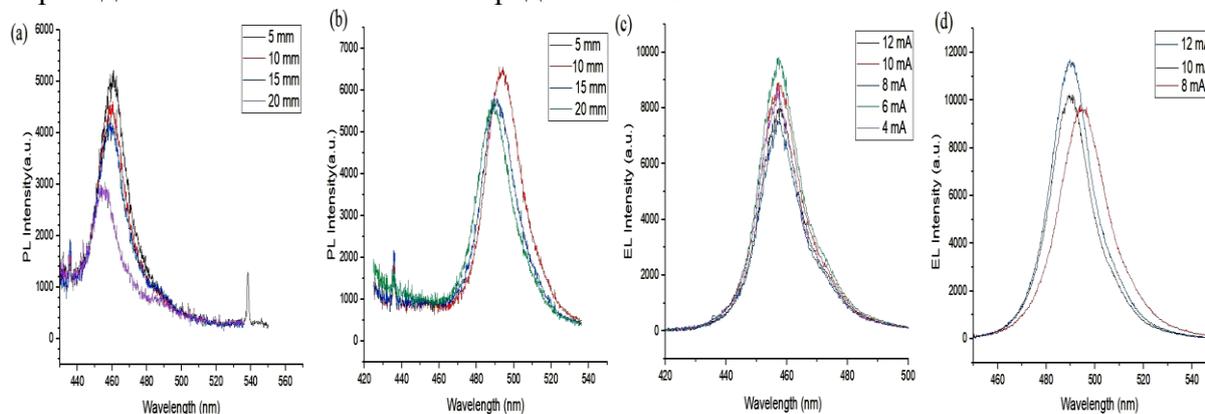


Рис. 1. (а), (б) Спектры фотолюминесценции и (с), (д) электролюминесценции гетероструктур с тремя и пятью КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GAN}$ в активной области

В спектрах ФЛ гетероструктур с тремя и пятью КЯ наблюдаются пики на длине волны 460 нм и 493 нм (рис.1.(a),(b)), которые соответствуют рекомбинации основных носителей заряда в КЯ InGaN между невозбужденными дырочными и электронными уровнями валентной зоны и зоны проводимости. При движении от центра к краю кристалла основной максимум ФЛ смещается в область меньших длин волн. Синее смещение происходит в результате неравномерного распределения встроенных пьезоэлектрических полей, которые приводят к сдвигу энергетических уровней вдоль всей активной области гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN (эффект Штарка). При движении от центра к краю кристалла напряженность встроенных полей возрастает.

При увеличении тока от 8 до 12 мА максимум в спектрах ЭЛ смещается в коротковолновую область (рис.1.(c),(d)). Синее смещение обусловлено неравномерным распределением индия (In) в процессе формирования исследованных гетероструктур методом газофазной эпитаксии. Слой GaN осаждается при более высоких (1000°C) температурах, чем слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (700°C). Поэтому в процессе осаждения GaN неизбежен процесс диффузии атомов In, что приводит к неравномерному распределению концентрации In вдоль всего активного слоя. Полученные спектры ФЛ и ЭЛ совпадают. Это говорит о том, что в исследованных гетероструктурах излучение возникает в результате межзонных переходов основных носителей заряда в КЯ InGaN.

Литература

Асланян А.Э., Авакянц Л.П., Червяков А.В. и др. // ФТП. 2020. Т. 54. № 4. С. 420 – 425.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦВЕТОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ

Гафуров В.Р.

*Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«МЭИ» в г. Смоленске, электроника и нанoeлектроника, Смоленск, Россия
E-mail: Karpidzew@yandex.ru*

В настоящее время существует растущая потребность в приборах, способных качественно регистрировать и измерять цветовые параметры объектов, включающих разные цвета и неоднородность структуры поверхности. Данная потребность особенно актуальна для таких областей, как геология и геммология, где точность измерений цветовых параметров может оказать существенное влияние на оценку качества и стоимости продукции. Кроме того, существует потребность в данном классе приборов для проведения колориметрических экспериментальных исследований в таких областях, как медицина, химия, пищевая промышленность и другие, где точность и надежность измерений цветовых параметров объектов является критически важной.

На сегодняшний день на рынке отсутствуют приборы, которые могут полностью удовлетворить требования, связанные с измерением цветовых параметров объектов сложной формы, включающих разные цвета и неоднородность структуры поверхности. Однако, разработка, представленная в ранее опубликованных статьях, может решить поставленные задачи, структурная схема которого представлена на рисунке 1 [2, 3].

В связи с этим, в данной статье представлено усовершенствование разработанного устройства для измерения цветовых параметров объектов, который может обеспечить высокую точность и надежность измерений даже в условиях неоднородности поверхности и наличия различных цветовых оттенков.

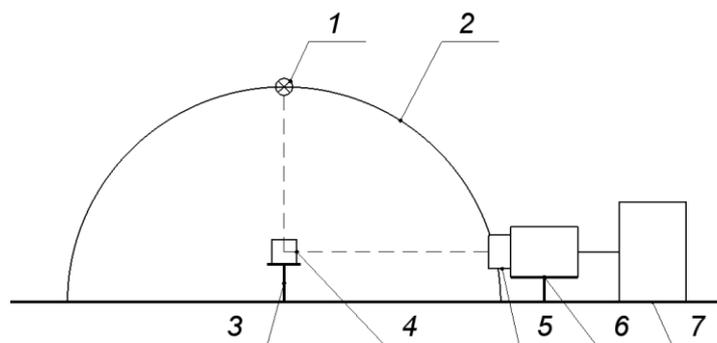


Рис. 1. Структурная схема устройства, где: 1 – источник излучения; 2 – короб; 3 – предметный стол; 4 – объект исследования; 5 – объектив; 6 – матричный фотоприемник; 7 – ПК

В ходе настоящего исследования были выдвинуты рекомендации по усовершенствованию устройства, используемого для измерения и анализа цветовых характеристик объектов. Одним из предложений является использование полусферической формы бокса в сочетании с диффузно-отражающим и поглощающим покрытиями на внутренних стенках. Такая конфигурация позволит обеспечить равномерное освещение объекта без возникновения бликов и засветок, а также предотвратить цветовые помехи за счет поглощения излишнего света. Более того, предложено использовать небольшой экран с диффузно-отражающим покрытием для регистрации цветовых параметров прозрачных объектов, а молочное стекло для регистрации цветовых характеристик излучающих, а также полупрозрачных и отражающих объектов.

Проектирование трехмерной модели бокса осуществлялось с использованием программного обеспечения SolidWorks для последующей печати на 3D-принтере и сборки. Для обеспечения оптимальной точности устройства, было учтено расположение отверстия под источник излучения в соответствии с рекомендациями Международной комиссии по освещению (МКО) по схеме освещения/наблюдение $d/0^\circ$, где в качестве d - 90° [1].

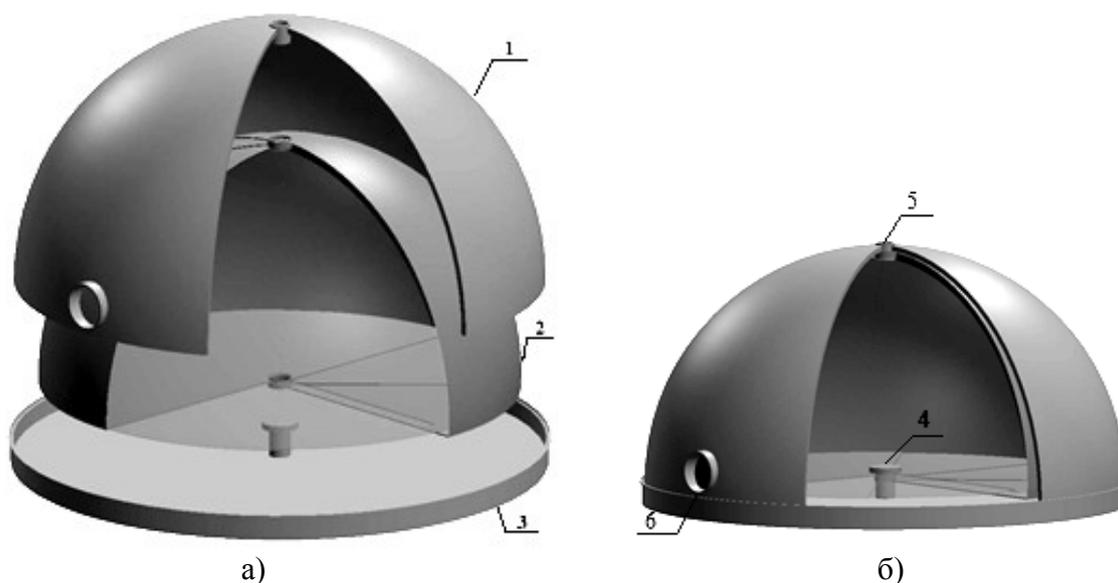


Рис. 2. Трехмерная модель короба в разобранном (а) и в собранном видах (б), где: 1 – полусфера с поглощающим покрытием; 2 – полусфера с отражающим покрытием; 3 – дно короба с поглощающим покрытием; 4 – предметный стол; 5 – отверстия под источник излучения; 6 – отверстие под объектив матричного фотоприемника

Кроме того, были предложены материалы для нанесения покрытий на внутренние стенки короба. Для диффузно-отражающего покрытия рекомендуется использовать $BaSO_4$, который обладает высокой рассеивающей способностью света. Для поглощаю-

шего покрытия рекомендуется использовать черную матовую краску или сверхчерное покрытие Vantablack, которые позволяют поглощать световые лучи с высокой эффективностью и предотвращают отражение света от внутренних поверхностей бокса.

Использование данных материалов позволяет добиться максимальной точности и качества измерений цветовых характеристик объектов, что является важным для широкого спектра научных и практических применений.

Таким образом, предложенные конструктивные изменения в устройстве для измерения и анализа цветовых характеристик объектов могут значительно повысить точность и качество измерений, а также расширить возможности измерения цветовых параметров объектов различной прозрачности и светоотражающих способностей.

Литература

1. Гуревич М.М. Цвет и его измерение: Учебник / М. Гуревич М.-Л.: Издательство Академии Наук СССР, 1950 - 267 с.
2. Гафуров В.Р. Анализ влияния цветового пространства на результаты измерений // Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов XIX-ой Нац. науч.-техн. конф. с межд. уч. В 2 т. Т. 1. Смоленск, 2022. 522 с. 238-241.
3. Жбанова В.Л., Гафуров В.Р., Структура фотокolorиметра // «Энергетика, информатика, инновации-2021». Сб. трудов XI-ой Нац. науч.-техн. конф. с межд. уч. В 2 т. Т. 1. Смоленск, 2022. 616 с. 424-427.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЯРКОСТИ НА ПАРАХ ХЛОРИДА МАРГАНЦА С ЕМКОСТНЫМ ТИПОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Гембух П.И., Шиянов Д.В., Тригуб М.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, Томск, Россия

E-mail: gembukh.pavel@ya.ru

Лазеры на парах металлов за счёт комбинации уникальных свойств, среди которых высокая спектральная яркость, высокая однородность среды, а также высокий коэффициент усиления [1], могут быть использованы в различных сферах, например, микрообработке материалов [2], лечении кожных заболеваний [3], а также визуализации различных процессов [4]. Визуализация быстропротекающих процессов, сопровождающихся фоновой засветкой, является одним из наиболее перспективных направлений использования этого типа лазеров, о чём косвенно свидетельствует большое количество современных работ, ведущихся в этом направлении. Суть метода заключается в подсветке интересующего нас объекта усиленным спонтанным излучением, после чего отраженный сигнал попадает обратно в активную среду. Далее происходит селективное усиление излучения и последующее проецирование его на экран. Особенностью является подавление паразитной фоновой засветки. Устройство, включающее в себя активный элемент с источником возбуждения, оптическую схему и устройство регистрации изображения, получило название лазерный монитор.

В основном в качестве активной среды для лазерных мониторов используются пары меди. Этот металл имеет наибольший коэффициент усиления, достаточно хорошо изучен и формирует излучения на двух длинах волн (510,6 нм, 578,2 нм). Существует ряд задач, в которых необходимо излучение в других областях спектра, например в инфракрасной. Примером такой задачи может быть наблюдения за развитием пробоя в нелинейных ZGP-кристаллах. Наиболее перспективной лазерной средой с точки зрения расширения спектрального диапазона является марганец. Благодаря сочетанию энергетических уровней, среда на парах атома марганца формирует излучение одновременно как в видимом (основные линии: 534,1 нм, 542 нм), так и в ближнем ИК (основные линии: 1290 нм, 1329 нм) диапазонах спектра.

Немаловажной характеристикой лазерного монитора является его временное разрешение. Оно определяет, насколько подробно можно исследовать процесс. Временное разрешение лазерного монитора зависит от частоты работы источника возбуждения. В основном источники возбуждения формируют импульсы накачки с частотой следования менее 20 кГц из-за использования тиратронов в качестве коммутаторов. Частоты выше 20 кГц принято считать высокими применимо для лазеров на парах металлов. Для возбуждения лазеров на высоких частотах используют таситроны, модуляторные лампы или полупроводниковые источники накачки. В рамках работы был использован высокочастотный источник возбуждения на основе таситрона.

В лазерном мониторе активный элемент работает в качестве усилителя. Основной характеристикой удобной для сопоставления активных элементов с различными режимами работы и активным веществом является усилительная. В рамках данной работы была использована известная методика исследования усилительных характеристик. Усиленное спонтанное излучение среды на парах хлорида марганца с помощью глухого зеркала направлялось обратно в активную среду, на выходе регистрировалась мощность усиленного излучения. Применение нейтральных светофильтров типа НС позволяло уменьшать мощность входного сигнала. Коэффициент усиления среды определяется по формуле:

$$K = \frac{P_1}{0,8 \cdot P_0 \cdot \sigma^2}.$$

Где K -коэффициент усиления, P_1 -мощность однопроходного усиления, $0,8$ -коэффициент отражения от зеркала, P_0 -мощность сверхсветимости активной среды и σ -коэффициент пропускания фильтра.

В эксперименте использовалась газоразрядная трубка (ГРТ) с емкостным способом возбуждения. В этом случае электроды выполняются в виде листа медной или ниобиевой фольги, обернутой вокруг ГРТ. Емкостные электроды, в отличие от “традиционных” внутренних электродов, не имеют контакта с химически агрессивной средой лазера, благодаря чему существенно увеличивается срок эксплуатации активного элемента. Параметры ГРТ: диаметр активной зоны: 30 мм, длина активной (нагреваемой) зоны: 50 см, диаметр выходных окон 5,5 см, давление буферного газа 20 Торр (Неон), Электроды выполнены из ниобиевой фольги, обернутой вокруг ГРТ. Длина электрода – 8 см. Частота работы источника возбуждения составляла 52,5 кГц, при напряжении 6,2 кВ и мощности 1612 Вт.

На рисунке 1 представлены усилительные характеристики активного элемента на парах хлорида марганца для всех линий излучения (а) и для ближней ИК области спектра (б). Выделение ИК области спектра осуществлялось с помощью светофильтра ИКС-1.

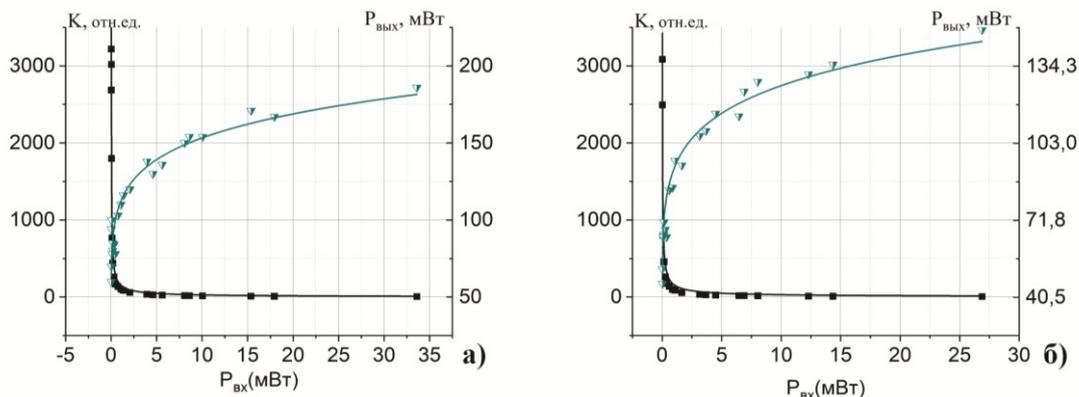


Рис. 1. Усилительные характеристики $MnCl_2$ активного элемента а) для всех линий излучения, б) для ИК области спектра

Полученные результаты качественно согласуются с полученными ранее для активных элементов на парах бромида меди как с традиционным, так и с емкостным спосо-

бом возбуждения [5]. Это позволяет утверждать, что данная активная среда может быть использована в составе лазерного монитора.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 19-79-10096-П.

Литература

1. Little, C. E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications. John Wiley & Sons Ltd. 1999.
2. Osipov, V. V, Evtushenko, G. S., Lisenkov, V. V, Platonov, V. V, Podkin, A. V, Tikhonov, E. V, Trigub, M. V, & Fedorov, K. V. Laser plume evolution in the process of nanopowder preparation using an ytterbium fibre laser. // Quantum Electronics. - 2016. – Vol. 46. - № (9), – P. 821–828. <https://doi.org/10.1070/QEL16023>
3. Ponomarev S.B. Topchiy, Y.N. Andrusenko, L.D. Shakina. The Successful Treatment of Eyelid Intra-dermal Melanocytic Nevi (Nevus of Miescher) With the Dual-Wavelengths Copper Vapor Laser // Journal of Lasers in Medical Sciences. - 2021. - Vol. 12, - P. 23. DOI: 10.34172/jlms.2021.23
4. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Smirnov A., Gubarev F.A. Optical System with Brightness Amplification for Monitoring the Combustion of Aluminum-Based Nanopowders // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69. – № 2. – P. 457–468. – DOI: 10.1109/TIM.2019.2903616.
5. Trigub M. v., Vasnev N. A., Gembukh P. I. Amplifying features of the CuBr active element excited by longitudinal capacitive discharge // Optical Engineering. - 2021. – Vol. 60. - № 08.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ.

Горанская С.А.

С-Пб. У телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: svetlancho.zueva@yandex.ru

Применение массивных голографических установок для экспериментальных исследований позволяет не особенно заботиться об ограничениях размеров оптической системы и стабильности интерференционной картины при записи голограмм. Однако это неудобно при практических применениях голографии или, например, при создании лабораторных работ для студентов. При небольших размерах оптической системы легче обеспечить стабильность интерференционной картины и требования к жесткости основания снижаются.

Для уменьшения габаритов оптической системы голографической записи, была выбрана схема квази-фурье-голографии, в которой на голограмме записывается фурье-спектр объекта, имеющий обычно небольшой размер, рис.1. Это позволяет уменьшить габариты используемых оптических элементов и габариты всего устройства [1]. Кроме того, при восстановлении голограммы в фурье-голографии может быть использована та же оптическая система (устройство ввода, фурье-объектив и фотоприемник), что и при формировании предметного пучка.

Схема разработанной нами экспериментальной установки представлена на рис.2. Она состоит из: полупроводникового лазера 2 с источником питания 1, нейтрального фильтра 3 поляризаторов 4, 7, 12, 18, коллиматора, состоящего из двух линз 8 и 9, жидкокристаллического пространственного модулятора света (ЖК ПМС) 10, фурье-объектива 11, WEB камеры 13, компьютера 15, блока управления ЖК матрицей 14, монитора 16, поворотных зеркал 5, 6, 20 и 21, делительного кубика 17 и линзы 19.

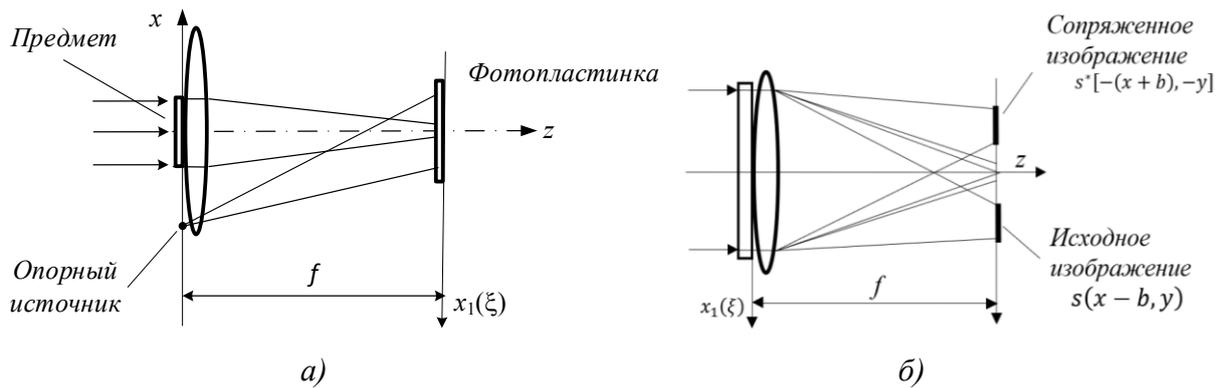


Рис.1. Схема записи (а) и восстановления (б) квази-фурье-голограммы.

Оптическая схема установки отличается от схемы квази-фурье голографии тем, что из конструктивных соображений свет от опорного точечного источника не проходит через фурье-объектив. Для того, чтобы схема работала как схема голографии Фурье, расстояние от точечного источника до фотоприемника следует выбирать так, чтобы кривизна волнового фронта опорного пучка в плоскости голограммы была равна кривизне волновых фронтов от точек входного изображения на ЖК ПМС, с учетом их преломления в фурье-объективе [2].

Поскольку в голографии Фурье сигналы вводятся плоскими транспарантами, то в качестве устройства ввода был выбран ЖК ПМС с электронным управлением от компьютера, работающий в режиме реального времени. ПМС, фурье-объектив и фотоприемная матрица используются как при записи, так и при восстановлении голограммы.

Для снижения требований к разрешающей способности фотоприемника, был выбран простой способ устранения нулевого порядка дифракции, при котором из голографической записи необходимо вычесть слагаемые, соответствующие нулевому порядку. Для этого нужно осуществить три регистрации сигналов на фотоприемнике – голограммы и отдельно интенсивностей света предметного и опорного пучков, которые затем вычитаются из голографической записи с помощью компьютера, эта разность используется в схеме восстановления вместо обычной голограммы.

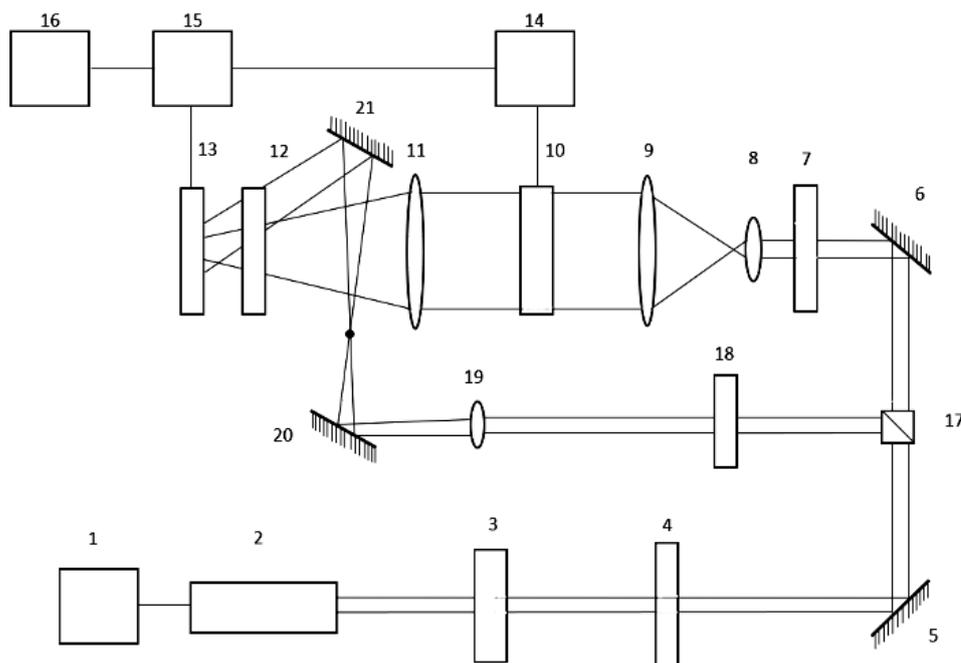


Рис.2. Схема экспериментальной установки для электронной записи и оптического восстановления голограмм.

Литература

1. Зуева С.А. / Электронный метод записи и восстановления голограммы // 75-я Юбилейная региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «СТУДЕНЧЕСКАЯ ВЕСНА – 2021», страницы 142-146.
2. Горанская С.А. / Разработка схемы экспериментальной установки для исследования методов записи и восстановления голограмм // 76-я Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «СТУДЕНЧЕСКАЯ ВЕСНА - 2022», страницы 40-43.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА СОЛЕГИРОВАНИЯ ИОНАМИ Yb^{3+} НА АП-КОНВЕРСИОННУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЛЮМИНОФОРОВ $SrF_2:Er$ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ 1.5 МКМ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Гущин С.В.,¹ Кузнецов С.В.,² Ляпин А.А.,¹ Пройдакова В.Ю.,²
Рябочкина П.А.,¹ Федоров П.П.,²

¹НИ Мордовский ГУ им. Н. П. Огарёва, Саранск, Россия

²ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

E-mail: serg.guschin1703@gmail.com

За последние несколько лет, ап-конверсионные люминофоры, легированные редкоземельными (РЗ) ионами являются главным объектом исследования у множества научных групп. Привлекательность ап-конверсионных люминофоров обусловлена их особыми оптическими свойствами, благодаря которым они находят применение в различных областях науки и техники, таких как: лазерной физике, биомедицине, солнечной энергетике, оптогенетике, криминалистике и т.д. [1-7].

В настоящей работе объектом исследования являлась концентрационные серии фторидных люминофоров со структурой флюорита $SrF_2:Er$ и $SrF_2:Er,Yb$, синтезированные методом соосаждения из водных растворов.

Фторидные люминофоры со структурой флюорита, легированные РЗ ионами, вызывают активный интерес исследования ап-конверсионного преобразования инфракрасного лазерного излучения благодаря своим уникальным особенностям [6,7]. Данные материалы характеризуются низкими значениями энергии фононов ($\sim 366 \text{ см}^{-1}$ SrF_2) и имеют склонность к образованию кластеров из РЗ ионов. Низкая энергия фононов приводит к уменьшению вероятности возникновения процессов многофононной релаксации. Вследствие этого наблюдается увеличение времени жизни промежуточных уровней РЗ ионов, которые играют важную роль в процессах ап-конверсионного преобразования. Тенденция образования кластеров из РЗ ионов в свою очередь приводит к уменьшению расстояния между РЗ ионами. Сокращение расстояния между РЗ ионами приводит к увеличению вероятности возникновения ап-конверсионных процессов (последовательная передача энергии, кооперативные процессы и процессы кросс-релаксации), основанных на межионном взаимодействии.

На рис. 1а представлен спектр отражения ионов Yb^{3+} и Er^{3+} в диапазоне 300-1700 нм, полученные для люминофора $SrF_2:Er(5.0\%),Yb(1.0\%)$. На спектре отчетливо просматриваются полосы поглощения, соответствующие электронным переходам ионов Er^{3+} с основного состояния $^4I_{15/2}$ на возбужденные мультиплеты $^4G_{11/2}$, $^2H_{9/2}$, $^4F_{3/2}$, $^4F_{5/2}$, $^4F_{7/2}$, $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$ и полоса, соответствующая электронному переходу $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} . При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531.8 нм был зарегистрирован спектр ап-конверсионной люминесценции для люминофора $SrF_2:Er,Yb$ (рис. 1б) соответствующий электронным переходам $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ионов Er^{3+} и $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$ ио-

нов Yb^{3+} . Исследованные люминофоры проявляют интенсивную ап-конверсионную люминесценцию в красной области спектра.

Максимальные значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции для спектрального диапазона 380-780 нм составили 0.19% и 0.2% для люминофоров $\text{SrF}_2:\text{Er}(14.2\%)$ и $\text{SrF}_2:\text{Er}(5.0\%),\text{Yb}(1.0\%)$ соответственно.

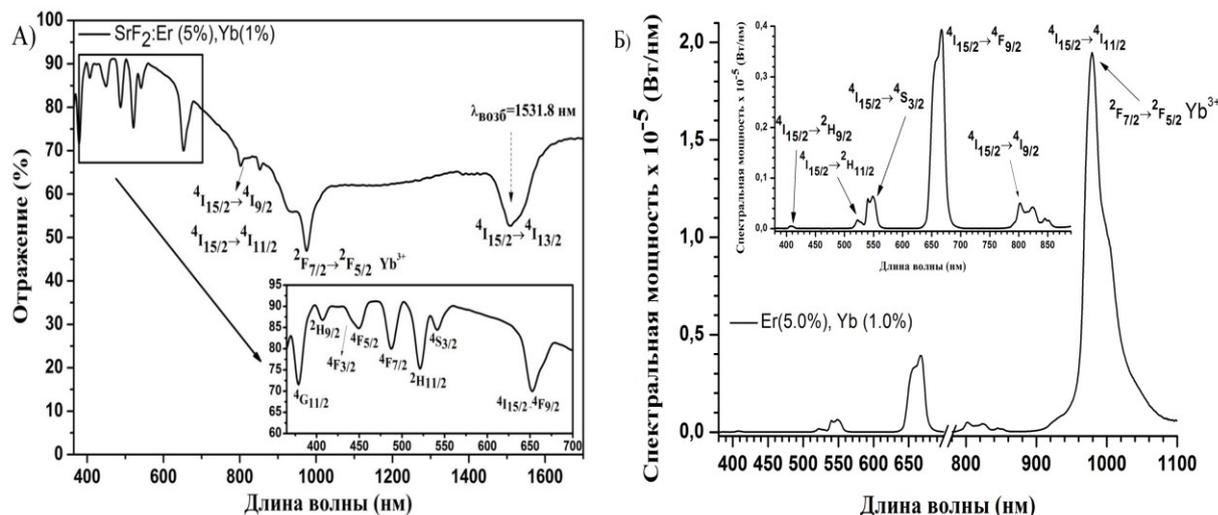


Рис. 1. А Спектр отражения люминофора $\text{SrF}_2:\text{Er}(5.0\%),\text{Yb}(1.0\%)$ в спектральном диапазоне 300-1700 нм; Б Спектр ап-конверсионной люминесценции люминофора $\text{SrF}_2:\text{Er}(5.0\%),\text{Yb}(1.0\%)$ при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1531.8 нм.

Исследование показало, что люминофоры $\text{SrF}_2:\text{Er},\text{Yb}$ способны преобразовывать инфракрасное лазерное излучение полуторомикронного спектрального диапазона в люминесценцию видимого и ближнего инфракрасного спектрального диапазона длин волн. Солегирирование люминофоров $\text{SrF}_2:\text{Er}$ ионами Yb^{3+} позволяет эффективно визуализировать лазерное излучение как в области 1.5 мкм, так и в области 1.0 мкм.

Литература

1. Liu X., Chen H., Wang Y., Si Y., Zhang H., Li X., Zhang Z., Yan B., Jiang S., Wang F., Weng S., Xu W., Zhao D., Zhang J., Zhang F. Near-infrared manipulation of multiple neuronal populations via trichromatic upconversion // *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12 (1). P. 5662.
2. Ghazy A., Safdar M., Lastusaari M., Savin H., Karppinen M. Advances in upconversion enhanced solar cell performance // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2021. Vol. 230. P. 111234.
3. Suo H., Zhu Q., Zhang X., Chen B., Chen J., Wang F. High-security anti-counterfeiting through upconversion luminescence // *Mater. Today Phys.* 2021. Vol. 21. P. 100520.
4. Wang M., Li M., Yang M., Zhang X., Yu A., Zhu Y., Qiu P., Mao C. NIR-induced highly sensitive detection of latent fingerprints by $\text{NaYF}_4:\text{Yb},\text{Er}$ upconversion nanoparticles in a dry powder state // *Nano Res.* 2015. Vol. 8 (6). P. 1800.
5. Auzel F. Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids // *Chem. Rev.* 2004. Vol. 104 (1). P. 139.
6. Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Gushchin S.V., Kuznetsov S.V., Chernov M.V., Proydakova V.Yu., Voronov V.V., Fedorov P.P. Upconversion Luminescence of Fluoride Phosphors $\text{SrF}_2:\text{Er},\text{Yb}$ under Laser Excitation at 1.5 μm // *Opt. Spectrosc.* 2018. Vol. 125. P. 537.
7. Lyapin A.A., Gushchin S.V., Kuznetsov S.V., Ryabochkina P.A., Ermakov A.S., Proydakova V.Yu., Voronov V.V., Fedorov P.P., Artemov S.A., Yapyntsev A.D., Ivanov V.K. Infrared-to-visible upconversion luminescence in $\text{SrF}_2:\text{Er}$ powders upon excitation of the $^4\text{I}_{13/2}$ level // *Opt. Mater. Express.* 2018. Vol. 8 (7). P. 1863.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРАСОЧНОГО СЛОЯ ФРЕСКОВОЙ ЖИВОПИСИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОТБОРА МИКРОПРОБ ОБРАЗЦА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Дедова А.Е.^{*}, Кононова Е.М.^{**}, Анисимова Т.И.^{**},
Брандт Н.Н.^{*}, Балахнина И.А.^{*}

^{*} МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

^{**} Центр реставрации монументальной живописи, Новгородский государственный
объединённый музей-заповедник, Великий Новгород, Россия

E-mail: dedova.ae19@physics.msu.ru

Лазерные методы широко применяются в реставрации объектов культурного наследия, например, таких как фресковая живопись. В частности, лазеры используются для очистки настенной живописи в результате лазерной абляции. Абляция представляет собой нелинейный пороговый процесс, в результате которого после поглощения лазерного импульса в образце формируется парогазовое облако продуктов абляции, и часть вещества выносится из материала образца [0]. Лазерная абляция может использоваться также в качестве метода отбора проб, как альтернатива традиционному пробоотбору с использованием скальпелей, скребков и щёток под микроскопом. Метод лазерного абляционного отбора микропроб (ЛАОМ) был применён для получения микрофрагментов бумажных материалов [0¹], красочных слоёв масляной [0] и фресковой [0] живописи. Преимущество ЛАОМ заключается в возможности бесконтактного получения проб размером в несколько микрометров за счёт фокусировки лазерного излучения на образце. Масштабы повреждения при лазерной абляции могут контролироваться изменением энергии импульса и остроты фокусировки. При использовании традиционных способов пробоотбора контроль повреждений невозможен.

В работе [0] показано, что ЛАОМ может успешно применяться к фресковой живописи при возбуждении на длине волны 1064 нм, а размер получаемых микропроб зависит от плотности энергии излучения. Однако вопрос об изменениях поверхности фрески в результате лазерного воздействия остаётся открытым.

В настоящей работе определяются изменения рельефа поверхности фрески на микрометровом масштабе и обсуждается изменение её химического состава в результате лазерной абляции при возбуждении на длине волны 1064 нм.

В экспериментах используются фрагменты старинных фресок (предположительно XII в.) разных цветов, предоставленные Центром реставрации монументальной живописи Великого Новгорода. Толщина красочного слоя варьируется от 40 до 150 мкм. Поверхность образцов неоднородная с шероховатой структурой, что характерно для фресковой живописи.

Для получения микропроб используется экспериментальная установка, подробно описанная в работе [0]. Для абляции используется Nd:YAG лазер, работающий в режиме модуляции добротности в одноимпульсном режиме с длительностью импульса 15 нс. Идентификация состава образцов и полученных микропроб проводится методом КР спектроскопии на конфокальном микроспектрометре DXR Raman.

Проведён анализ поверхностей образцов до и после ЛАОМ при различных плотностях энергии. Сделаны выводы о влиянии состава образца на результат отбора проб и даны рекомендации о том, какие параметры возможно использовать для ЛАОМ с фресковой живописи.

Работа выполнена с использованием конфокального КР микроскопа DXR Raman, приобретённого за счёт средств Программы развития Московского университета и при финансовой поддержке РФФИ № 21-78-10077 и Фонда развития теоретической физики и математики «Базис».

Литература

1. С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук, Избранные задачи теории лазерной абляции, УФН 2002, 172(3), 301-333. [Doi: 10.3367/UFNr.0172.200203b.0301](https://doi.org/10.3367/UFNr.0172.200203b.0301).
2. I.A. Balakhnina et al., Laser ablation of paper: Raman identification of products, Appl. Phys. A: Mat. Sci. Proc. 2014, 117(4), 1865-1871. Doi: 10.1007/s00339-014-8848-7.
3. I.A. Balakhnina et al. Laser ablation as a method for microsampling of paint layers, Las. Phys. 2022, 32, 066001. Doi: 10.1088/1555-6611/ac687a.
4. A.E. Dedova et al., Microsampling of Veliky Novgorod frescoes using laser ablation, Opt. and Quant. Electr. 2023. Paper is under review.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕКАРСТВЕННОГО ПРЕПАРАТА «МЕТОТРЕКСАТ» В ПЛАЗМЕ КРОВИ ЧЕЛОВЕКА МЕТОДОМ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА

Демишкевич Е.А.,^{1,2} Зюбин А.Ю.,¹ Евтифеев Д.О.,¹ Самусев И.Г.,¹

¹*Балтийский ФУ им. Иммануила Канта, ОНК «Институт высоких технологий», Калининград, Россия*

²*Саратовский НИГУ имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

E-mail: ldemishkevich@gmail.com

Метотрексат (МТХ) является стандартным препаратом, который назначают в низких дозах при ревматоидном артрите (РА). РА представляет собой хроническое воспалительное заболевание неизвестной этиологии, которое в основном поражает более мелкие синовиальные суставы симметричным образом, что в большинстве случаев приводит к разрушению суставов. В настоящее время он является одним из наиболее часто используемых препаратов при лечении РА [3]. Однако МТХ является цитотоксическим из-за его действия не только на поврежденные клетки, но и на другие ткани. Прием МТХ больными иногда вызывает такие серьезные токсические эффекты, как легочные, почечные, печеночные нарушения, миелосупрессия [1]. В клинических условиях токсические эффекты можно свести к минимуму путем тщательного мониторинга МТХ в сыворотке крови, что имеет большое значение в клинике и фармацевтике.

Биосенсоры, основанные на локализованном поверхностном плазмонном резонансе (LSPR), стали перспективным методом для клинического и химического анализа благодаря своей высокой чувствительности. Большое внимание привлекли методы на основе гигантского комбинационного рассеяния света (ГКРС), обладающие преимуществами быстрой регистрации спектрального сигнала, неразрушающего сбора данных, точной регистрации спектрального отпечатка [2].

В данной работе на первом этапе была разработана методика двухстадийного химического синтеза золотых нанозвезд (AuNS) с использованием зародышевых наночастиц (НЧ). Поглощение полученных НЧ регистрировалось в длинноволновой области, выраженный пик плазмонного резонанса регистрировался при длине волны $\lambda=660$ нм. Далее, золотые нанозвезды были нанесены на кварцевые стекла марки КУ-1, размером 37×24 мм. Полученные кварцевые стёкла с нанесенными на них НЧ были использованы для регистрации спектров гигантского комбинационного рассеяния света.

В рамках данного исследования для экспериментальной части использовался анализатор КРС Virsa (Renishaw, UK). В ходе эксперимента был использован лазер с длиной волны возбуждения $\lambda = 785$ нм. В работе был использован МТХ концентрацией 10^{-2} - 10^7 М. Регистрация спектров проводилась при условиях: динамическая съёмка в диапазоне обратных волновых чисел $400-1800$ см^{-1} , 30 секунд, длина волны лазера 785 нм, мощность лазера 10 мВт. В качестве характеристического пика препарата был выбран пик при 1360 см^{-1} . Как видно из рисунка 1, с помощью НЧ удалось зарегистрировать

спектр от МТХ концентрацией 10^{-5} М, в то время как спектр МТХ концентрацией 10^{-2} М на чистом кварце спектр не регистрируется (контрольный спектр). В ходе исследования было определено, что концентрации препарата 10^{-6} М и 10^{-7} М не регистрируются.

Далее определялось наличие МТХ в плазме крови человека. Для этого было смешано 100 мкл плазмы крови здорового добровольца и 100 мкл чистого препарата. После, полученную смесь держали при комнатной температуре на протяжении 15 минут, а затем наносили на кварцевую поверхность модифицированную НЧ. Как видно из рисунка 2, характеристический максимум чистого МТХ регистрируются после смешивания с плазмой крови человека.

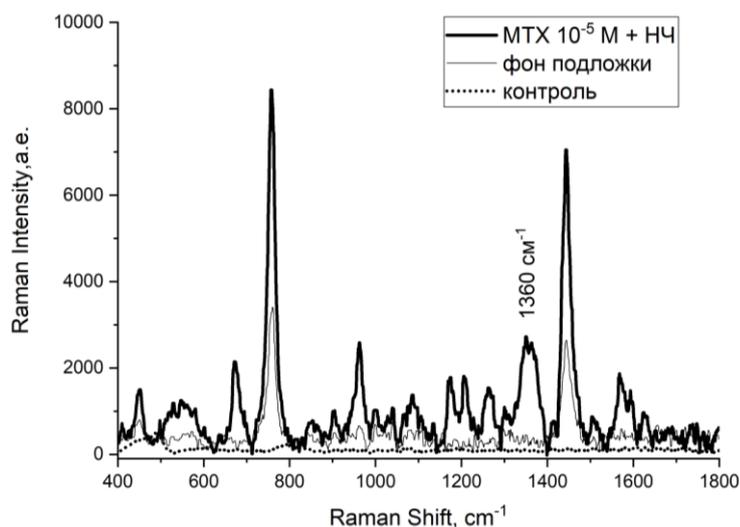


Рисунок 1. Спектр комбинационного рассеяния света (КРС) от МТХ концентрацией 10^{-2} М, нанесенного на чистое кварцевое стекло (черная пунктирная линия-контроль) и спектр КРС от МТХ концентрацией 10^{-5} М нанесенного на кварцевое стекло с AuNS (толстая сплошная линия), а также спектр от фона подложки без МТХ (тонкая сплошная линия).

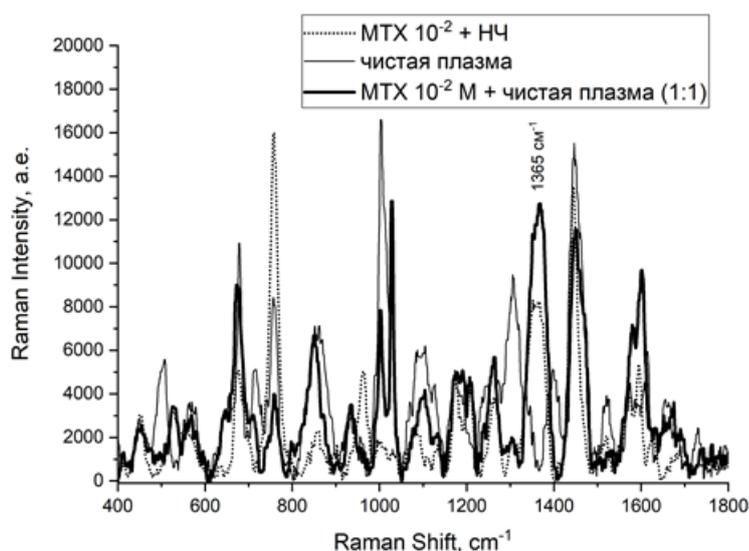


Рисунок 2. Спектр КРС от МТХ концентрацией 10^{-2} М, нанесенного на кварцевое стекло с AuNS (черная пунктирная линия-контроль), спектр КРС от плазмы крови (тонкая сплошная линия), спектр КРС от раствора состоящего из 100мкл МТХ концентрацией 10^{-2} М и 100 мкл плазмы (толстая сплошная линия).

Работа выполнена на базе НОМЦ «Северо-Западный центр математических исследований имени Софьи Ковалевской» в рамках Соглашения № 075-02-2022-872.

Литература

Asbahr D. et al. Differential pulse adsorptive stripping voltammetric determination of nanomolar levels of methotrexate utilizing bismuth film modified electrodes //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – Т. 188. – С. 334-339.

Aoki P. H. B. et al. Surface-enhanced Raman scattering (SERS) applied to cancer diagnosis and detection of pesticides, explosives, and drugs //Reviews in Analytical Chemistry. – 2013. – Т. 32. – №. 1. – С. 55-76.

Kinder A. J. et al. The treatment of inflammatory arthritis with methotrexate in clinical practice: treatment duration and incidence of adverse drug reactions //Rheumatology. – 2005. – Т. 44. – №. 1. – С. 61-66.

КВАНТОВЫЕ ЯМЫ ALGAINAS ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 1300-1550 НМ

Дибольский Р.В.¹, Туркин А.Н.¹, Мармалюк А.А.²

¹МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,

²научный консультант (АО НИИ "Полюс им. М.Ф.Стельмаха")

E-mail: dibolskii.rv19@physics.msu.ru

Спектральный диапазон 1300-1550 нм представляет собой телекоммуникационный диапазон. Инжекционные полупроводниковые лазеры долгое время совершенствовались, прежде чем смогли в достаточной мере удовлетворить требованиям широкого класса телекоммуникационных систем. Цифровым наземным и подводным линиям дальней связи требуются надёжные и быстродействующие лазеры с малым чирпом. [1]

Первая проблема создания таких лазеров заключается в том, что носители заряда могут покидать активную область, снижая квантовую эффективность прибора. Оже-рекомбинация дополнительно уменьшает излучательную рекомбинацию, снижая коэффициент полезного действия.

Для борьбы с указанными эффектами очень действенным оказался подход создания упругих напряжений активной области, позволяя отодвинуть порог генерации дислокаций несоответствия.

Основной задачей работы являлось построение линий постоянного уровня 1300 нм и 1550 нм в случаях, когда материал ямы AlGaInAs согласован с подложкой InP и когда в квантовую яму и барьерный слой вносится упругое напряжение. Математическую модель данной схемы задаёт система уравнений [2]:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{2m_e E}{\hbar^2}} L = \pi n - 2 \arcsin\left(\sqrt{\frac{E}{U}}\right) \\ \sqrt{\frac{2m_h H}{\hbar^2}} L = \pi n - 2 \arcsin\left(\sqrt{\frac{H}{U}}\right) \\ \frac{hc}{\lambda} = E_g + E + H \end{cases} \quad (1)$$

Дальнейшее исследование связано с изучением параметров упруго напряжённой квантовой ямы AlGaInAs, а также анализов полученных результатов.

Литература

1. В.Н. Трещиков, В.Н.Листвин. DWDM-системы IV // Издание 4-е, М.: Изд-во "Техносфера", 2021, 400 стр.
2. А.Е.Жуков. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур // СПб.: ООО "Техномедиа" Изд-во "Элмор", 2007, 304 стр.

МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ РЕЛЬЕФНОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЫ

Долгополов И.С.

Дальневосточный ГУ путей сообщения, Хабаровск, Россия

E-mail: iamd47j@gmail.com

Оптический фильтр на основе глубокой рельефной структуры переменной глубины предназначен для фильтрации оптического излучения в видимом и ближнем инфракрасном излучении. Ранее уже рассматривался оптический фильтр на основе глубокой периодической рельефной структуры (ГРС) [1]. Далее существующее решение было доработано до фильтра на основе ГРС с переменной глубиной рельефа, что обеспечивало повышение коэффициента передачи мощности оптического излучения с входа устройства на его выход при фильтрации определенных длин волн оптического излучения с изменением не только угла падения входного излучения, но и за счет дискретного изменения глубины рельефа дифракционной решетки [2]. Недостатком данного решения является ограниченный (дискретный) набор выделяемых спектральных линий, обусловленный ступенчатым изменением глубины регулярной дифракционной структуры.

Данная проблема может быть решена, если оптический фильтр (рис. 1) будет выполнен с использованием глубокой рельефной структуры переменной глубины, изменяющейся по линейному закону (рис. 2), что обеспечит повышение коэффициента передачи мощности оптического излучения со входа устройства на его выход с увеличенным количеством выделяемых отдельных спектральных линий.

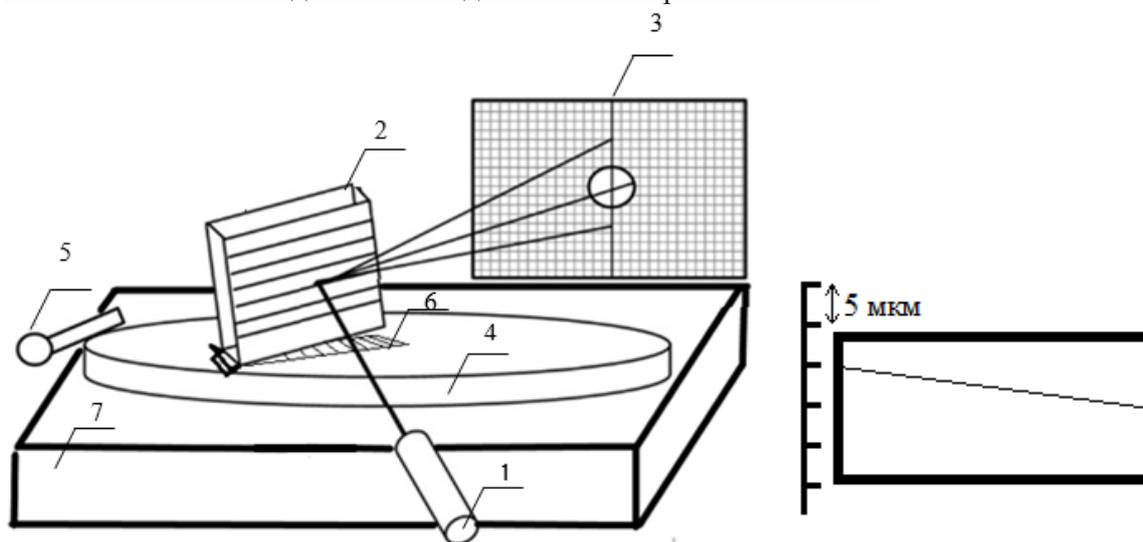


Рис. 1. Схема фильтра спектров оптических сигналов на основе ГРС переменной линейной глубины: 1 – источник излучения; 2 – рельефная структура переменной глубины, изменяющаяся по линейному закону; 3 – пространственный фильтр; 4 – поворотная платформа для регулировки угла падения входного пучка излучения; 5 – механизм поворота платформы; 6 – механизм движения рельефной структуры переменной линейной глубины; 7 – основание

Рис. 2. Схема глубокой рельефной структуры переменной линейной глубины (вид сбоку)

Литература

1. Комоцкий В. А., Соколов Ю. М., Суетин Н. В. // Патент России № 181381 U1. 2018.
2. Долгополов И.С., Петрова М.С., Сьюй А. В. // Сборник трудов XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2019». – 2019. С. 103–105.

ЭФФЕКТЫ БЫСТРОГО И МЕДЛЕННОГО СВЕТА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЧИРПИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛАХ

Доценко А.А., Ремизов О.А.¹

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: *dotsenko.a@shg.ru*

Микро- и наноструктурирование материалов позволяет создавать искусственные среды с новыми оптическими свойствами, что широко используется в фотонике для усиления линейных и нелинейных оптических эффектов. Большое внимание привлекли гиперболические метаматериалы (ГММ), представляющие собой одноосные среды, обладающие противоположными знаками главных компонент тензора диэлектрической проницаемости. Эта особенность приводит к гиперболической изочастотной поверхности света в ГММ и распространению в них волн с необычно большой величиной волнового вектора [1], что было использовано для усиления излучения источников света, расположенных внутри ГММ, достижения условий фазового синхронизма при нелинейно-оптическом преобразовании частоты лазерного излучения, преодоления дифракционного предела в микроскопии с использованием ГММ. На практике ГММ могут быть получены созданием массива металлических наностержней в диэлектрической матрице. Важной особенностью таких композитных сред является ENZ (epsilon-near zero) режим, в котором близко к нулю значение эффективной диэлектрической проницаемости (ϵ_e), связанной с направлением вдоль металлических наностержней. Интерес к ENZ режиму, в частности, вызван возможностью создания полностью оптических модуляторов лазерного излучения, основанных на вариации ϵ_e при воздействии на ГММ интенсивного излучения.

Конечный размер металлических наностержней и расстояния между ними в диэлектрической матрице ГММ приводит к появлению пространственной дисперсии диэлектрической проницаемости композита ϵ_e , т.е. ее зависимости от волнового вектора (k) световой волны в метаматериале $\epsilon_e(\omega, k)$. Это становится особенно существенным в спектральной окрестности ENZ режима, когда вариация близкого к нулю значения ϵ_e , вызванная пространственной дисперсией ГММ, существенно сказывается на прохождении света через ГММ. В результате в ГММ появляется дополнительная световая волна, распространяющаяся внутри композита помимо двух главных волн, обыкновенной и необыкновенной. Недавно было показано, что деструктивная интерференция волн в ГММ вызывает появление фазовых сингулярностей в спектрально-угловой зависимости его коэффициента пропускания, приводя к эффектам быстрого и медленного света при распространении лазерных импульсов через ГММ [2].

В данной работе экспериментально исследованы динамика фемтосекундных лазерных импульсов в ГММ и влияние чирпирования импульсов на их временную задержку внутри метаматериала.

Экспериментальные исследования проводились для ГММ, состоящих из массива серебряных наностержней в матрице пористого анодного оксида алюминия (АОА), полученной анодированием пленки алюминия. Металлические наностержни, электрохимически осажденные в поры АОА, имели длину около 1 мкм и диаметр 30 ± 4 нм, среднее расстояние между их центрами составляло около 100 нм. Измерения частотно-углового спектра пропускания ГММ показали, что структура демонстрирует ENZ режим в спектральной окрестности длины волны света $\lambda_{ENZ}=810$ нм, что проявляется выраженным минимумом пропускания вблизи λ_{ENZ} . Обнаружено, что исследуемая композитная структура проявляет сильную пространственную дисперсию, приводящую к серии дополнительных минимумов пропускания в спектральной области ENZ режима (Рис.1а). Динамика лазерных импульсов вблизи именно этих особенностей исследуется в данной работе.

В эксперименте использован титан-сапфировый лазер, генерирующий импульсы с частотой повторения 80 МГц и длительностью около 60 фс, центральная длина волны которых могла перестраиваться в диапазоне 720–890 нм. Для измерения временной задержки (τ) импульсов света в ГММ использовалась схема нелинейной кросс-корреляции интенсивностей опорного лазерного импульса и сигнального импульса, прошедшего через метаматериал. Последний имел р-поляризацию и предварительно чирпировался, проходя через толстый слой стекла толщиной несколько сантиметров. Чирп импульсов характеризовался безразмерным параметром β , определяющим уширение исходного импульса в $(1+\beta^2)^{1/2}$ раз. Угол падения света на структуру варьировался в диапазоне 0° - 50° .

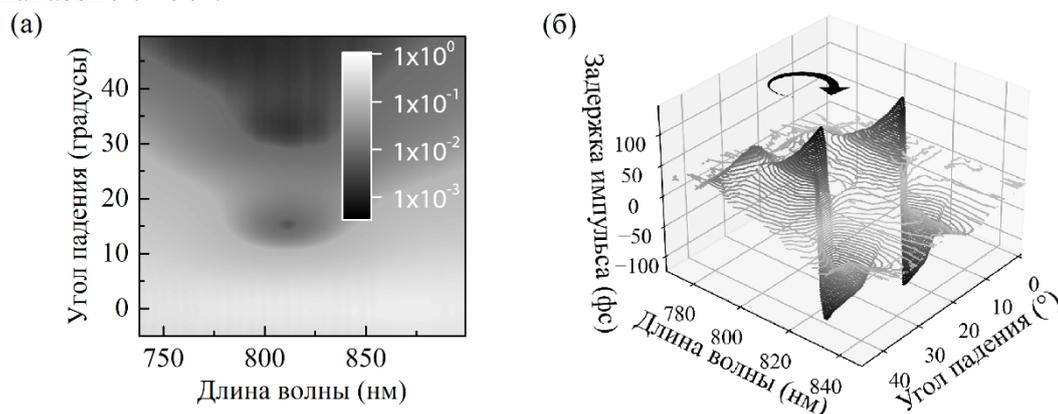


Рис 1. Спектрально-угловые зависимости (а) пропускания р-поляризованного света через ГММ и (б) задержки τ при прохождении чирпированного импульса света с $\beta \approx 3$ через ГММ.

На Рис. 1 (б) приведена измеренная частотно-угловая зависимость задержки максимума лазерного импульса, прошедшего через ГММ, для случая $\beta \approx 3$. Обнаружены эффекты медленного и быстрого света в ENZ режиме метаматериала, что проявляется наблюдением областей положительных и отрицательных значений τ , достигающих 150 фс и -150 фс соответственно (Рис. 1(б)). Установлено, что возникновение этих динамических эффектов вызвано пространственной дисперсией света в ГММ и фазовыми сингулярностями пропускания вблизи λ_{ENZ} . Обнаружено, что чирпирование падающих импульсов усиливает эффекты быстрого и медленного света, приводя к большим значениям τ по сравнению со случаем $\beta=0$. Принципиально важно, что при чирпировании наблюдается поворот резонансной зависимости τ в спектрально-угловой карте этой величины, что проиллюстрировано стрелкой на Рис. 1 (б). Направление поворота определяется знаком чирпа. Обнаруженное влияние чирпирования на динамику излучения, проходящего через ГММ, согласуется с результатами расчетов [2] и позволяет реализовать переход между режимами быстрого и медленного света путем варьирования центральной длины волны чирпированных импульсов ($\beta \approx 3$) или угла падения света в случае отсутствия чирпа ($\beta=0$).

Автор выражает благодарность Новикову В.Б., Мурзиной Т.В., Леонтьеву А.П., Напольскому К.С.

Литература

- [1] A. Poddubny, I. Iorsh, P. Belov, Y. Kivshar, (2013). "Hyperbolic metamaterials. Nature photonics", 7(12), pp. 948-957 (2013)
- [2] V. B. Novikov, A. P. Leontiev, K. S. Napolskii, and T. V. Murzina, 'Nonlocality-driven switchable fast-slow light effect in hyperbolic metamaterials in epsilon-near-zero regime', Phys. Rev. B 106, p. 165415 (2022)

СОЗДАНИЕ УЯЗВИМОСТЕЙ В СИСТЕМАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ АТАКИ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ

Жлуктова И.В.¹, Ружицкая Д.Д.^{2,3}, Поносова А.А.^{1,2,3}, Камынин В.А.¹,
Макаров В.В.^{2,3,4}

¹ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

³НИТУ МИСиС, Москва, Россия

⁴Университет науки и технологии Китая, Шанхай, Китайская Народная Республика

E-mail: iv.zhuktova@gmail.com

Системы квантового распределения ключей (КРК) позволяют создать секретный криптографический ключ для безопасного обмена информацией между удаленными пользователями [1]. Несмотря на то, что протоколы КРК гарантируют абсолютную теоретическую безопасность, в реальном оборудовании могут иметься “побочные каналы”, которые используются квантовыми взломщиками для получения информации о создаваемом ключе. К настоящему моменту практически нет работ по экспериментальному исследованию атак интенсивным лазерным излучением на системы КРК в широком диапазоне спектральных и генерационных характеристик лазеров. Поэтому, представленная работа посвящена исследованию влияния атаки импульсным лазерным повреждением на защитные оптические элементы систем КРК, так как это может привести к широкому спектру различных эффектов, таких как нелинейные эффекты, пробой диэлектрика и т.д.

Основной целью является разработка надежной контрмеры против атаки лазерным повреждением источников КРК и общей методологии определения характеристик волоконно-оптических компонентов для защиты систем КРК, включая выбор режимов излучения для сертификационных испытаний. На рис.1. представлена экспериментальная установка, которая имитирует атаку импульсным лазерным излучением на волоконно-оптический изолятор с рабочей длиной волны 1.55 мкм. В качестве лазера-взломщика использовался полностью волоконный иттербиевый лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод, и излучающий на длине волны 1061 нм [2]. Длительность импульсов воздействующего излучения составляла 300–700 пс в зависимости от использованного каскада волоконных усилителей, предназначенного для увеличения средней и пиковой мощности.

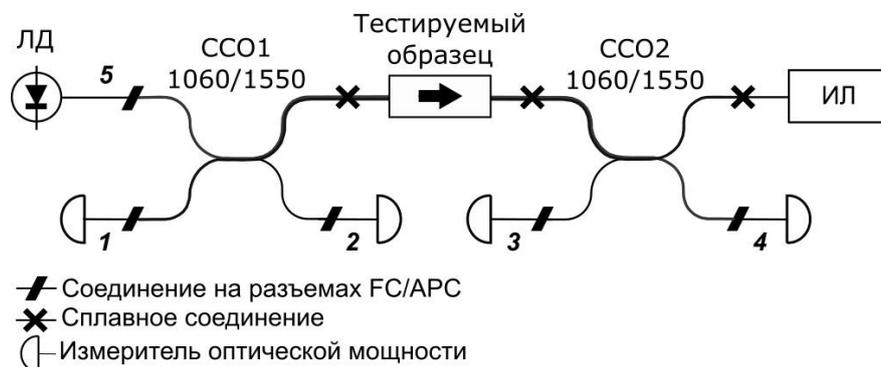


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ИЛ- импульсный лазер, ЛД- лазерный диод, ССО- спектрально-селективный ответвитель

Время воздействия на тестируемые образцы не превышало 15–20 мин, а максимальная средняя мощность воздействия была около 1.1 Вт. Также, для оценки результатов, первоначально были получены спектральные характеристики тестируемых образцов, а также проводился постоянный контроль за временными и спектральными параметрами лазера-взломщика.

При тестировании образцов оптических изоляторов было отмечено, что повреждение импульсным излучением приводит к долговременному снижению изоляции на 10.8–31.4 дБ, сохранившемуся более, чем в течение нескольких дней после воздействия интенсивным лазером, без резкой потери прозрачности в прямом направлении. Также выяснилось, что со временем, некоторые ранее поврежденные образцы восстанавливаются в течение полугода после проведения серии экспериментов по лазерному повреждению. Сделан вывод, что использование оптических изоляторов в качестве контрмеры для защиты от повреждения импульсным лазерным излучением системы КРК достаточно эффективно. Однако ввиду спектральной зависимости коэффициента изоляции компонентов от длины волны, прошедшего излучения в области частичной прозрачности волоконно-оптических изоляторов может быть достаточно для реализации других атак с инъекцией излучения в источник КРК - атаки Троянским конем и засевом лазера источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант 075-15-2022-315) и Российского научного фонда (грант 21-42-00040).

Литература

1. Sajeed S., Chaiwongkhot P., Huang A., Qin H., Egorov V., A. Kozubov, A. Gaidash, V. Chistiakov, A. Vasiliev, A. Gleim, and V. Makarov, An approach for security evaluation and certification of a complete quantum communication system// Sci. Rep. 2021. Vol. 11. P. 5110.
2. Zhluktova I.V., Filatova S.A., Trikshev A.I., Kamynin V.A., and Tsvetkov V.B., All-fiber 1125 nm spectrally selected subnanosecond source// Appl. Opt. 2020. Vol. 29. P. 9081.

MULTICOMPONENT METAL IRON AGE ARTEFACTS ANALYSIS BY LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY

Ivanova P.A.

Belarusian State University, physics faculty, Minsk, Belarus

E-mail: p123456ivanova@yandex.by

The possibilities of using laser induced breakdown spectroscopy for elemental analysis of multicomponent metal Iron Age artefacts are studied. Much attention is paid to the influence of dirt, patina, rust, and scale on the process of laser ablation, and, as a result, on the relative intensity of spectral lines. A method is proposed to estimate the thickness of molecular compounds on the surface of metal artifacts to subsequently exclude the corresponding spectral data from the analysis results. It has been found that during laser ablation of pure metal samples at fixed radiation parameters, the relative intensity of spectral lines during ablation of a modern sample can significantly (up to 30 %) exceed the intensity for an old sample that has been underground for a long time. Thus, a quantitative analysis using calibration curves, built on the basis of modern standard samples, will lead to incorrect results. In this case, the transition from single-pulse to double-pulse laser ablation, which leads to a multiple increase in the relative intensity of spectral lines, is very important, since it allows one to significantly increase the sensitivity of the analysis and reduce the error.

Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) is one of the most common methods of low-destructive elemental analysis. It is widely used in industry, research of biological objects, minerals, medicines, explosives, artifacts, etc. [3, 5]. The method came into prominence by a number of advantages: small amounts of substance required for analysis; lack of preliminary chemical and mechanical surface preparation; low sample destruction (crater diameter 100 μm , layer thickness 3–5 μm); the possibility of studying in the air; simultaneous concentration determination of all elements difficult to detect by other methods; samples remote

analysis including underwater ones. Despite the ability to analyse almost any sample using the LIBS method, this method is most often used to study metals and multicomponent alloys. In addition to modern industrial products and raw materials for them, LIBS has been used for several decades to analyse ancient objects and artifacts, where it successfully competes with such a popular approach as X-ray fluorescence analysis [1, 2, 6]. Despite the fact that the latter is completely non-destructive, it does not make it possible to study the change in concentration with depth. During the LIBS of objects from archaeological excavations, the authors of publications practically do not pay attention to preparing the surface for analysis. Indeed, practically in all software of LIBS spectrometers it is possible to set a certain number of laser prepulses that will evaporate the substance, while the spectra will not be recorded. After such cleaning of the sample from contamination, patina, rust, the object is analysed, in the same way as in the case of modern industrial samples

The experiment was carried with the help of LAEMS (laser atomic emission multichannel spectrometer) developed and manufactured in the Belarusian State University at the department of laser physics and spectroscopy of the physics faculty and the spectroscopy laboratory of the A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems. A solid-state laser with semiconductor pumping is used as a source of excitation. The use of semiconductor pumping instead of pulse lamp pumping allows to increase the system resources and stability of output characteristics significantly [7]. The laser consists of two radiator and provides the generation of double pulses with the following characteristics: the duration of pulses is 15 ns, pulse energy variation range is 0 – 100 mJ, the range of variation of the delay duration between double laser pulses is 1–100 ns, pulse pair repetition rate is up to 10 Hz. The other analytical characteristics of the laser include spectral range (190 – 800 nm), spectral resolution (0.5 nm), the diameter of the laser beam on a sample surface (50 μm), dimensions of the analysed samples (200 \times 200 \times 200 mm), positioning accuracy on a sample surface (100 μm), the number of chemical elements to be determined (50). The sample is placed on a table moved along the beam using a linear low-profile positioned platform (manual movement), and in two directions perpendicular to the beam using linear motorised positioned platforms, which provides the possibility of computer-controlled scanning of the sample surface. To register plasma spectra, spectrometers with registration on a CCD ruler are used: based on the SDH-1 polychromator (the spectral range is 190 – 800 nm, the resolution is 0.1 nm with a width of the simultaneously recorded spectral range of 130 nm) and a lattice spectrometer of the original design. Double-pulse LIBS is the preferred method for the analysis of metal samples covered with patina, scale, rust, because it allows not only to clean the surface directly during the study, but also to estimate the thickness of the layer of these compounds. It was found that during laser ablation of scale and patina, the thickness of the evaporated layer is much lower than when exposed to the cleaned surface of metals, which is caused by the infusibility of these compounds. The process of laser ablation of rust is more complex, hydrated iron oxide and iron metahydroxide are porous materials. In addition, it is necessary to take into account the fact that the thickness of the rust, even in localized nearby surface areas, may differ.

Double-pulse LIBS is the preferred method for the analysis of metal samples covered with patina, scale, rust, because it allows not only to clean the surface directly during the study, but also to estimate the thickness of the layer of these compounds. It was found that during laser ablation of scale and patina, the thickness of the evaporated layer is much lower than when exposed to the cleaned surface of metals, which is caused by the infusibility of these compounds. The process of laser ablation of rust is more complex, hydrated iron oxide and iron metahydroxide are porous materials. In addition, it is necessary to take into account the fact that the thickness of the rust, even in localized nearby surface areas, may differ.

References

1. Abdelhamid M, Grassini S, Angelini E, Ingo GM, Harith MA. Depth profiling of coated metallic artifacts adopting laser-induced breakdown spectrometry. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2010;65(8):695–701. DOI: 10.1016/j.sab.2010.03.017.

2. Alberghina MF, Barraco R, Brai M, Schillaci T, Tranchina L. Integrated analytical methodologies for the study of corrosion processes in archaeological bronzes. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy*. 2011;66(2):129–137. DOI: 10.1016/j.sab.2010.12.010.
3. Galbács G. *Laser-induced breakdown spectroscopy in biological, forensic and materials sciences*. Berlin: Springer; 2022. 313 p.
4. Huletski DV, Ermalitskaia KF. Laser microanalysis of corroded ancient silver-copper coins. *Vestnik BGU. Seriya 1. Fizika. Matematika. Informatika*. 2016;2:21–25. Russian.
5. Musazzi S, Perini U. *Laser-induced breakdown spectroscopy*. Berlin: Springer; 2014. 565 p. DOI: 10.1007/978-3-642-45085-3.
6. Pitarch A, Queralt I, Alvarez-Perez A. Analysis of Catalonian silver coins from the Spanish war of independence period (1808–1814) by energy dispersive X-ray fluorescence. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2011;269(3):308–312. DOI: 10.1016/j.nimb.2010.11.045.
7. Voropay ES, Gulis IM, Tarasau DS, Ermalitskaia KF, Samtsov MP, Radko AE, et al. Laser atomic emission spectrometer with achromatic optical system. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2021;88(3):603–609. DOI: 10.1007/s10812-021-01215-2.

ТРАНСФОРМАЦИЯ КВАДРАТУРНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Илюшин П.Я.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
e-mail: iliushin.pi19@physics.msu.ru

Использование оптических волокон для передачи информации имеет ряд преимуществ по сравнению с витой парой: скорость передачи на порядок выше, отсутствие воздействия между проложенными рядом волокнами и большие расстояния передачи, связанные с меньшим поглощением волокна. Однако совсем пренебречь поглощением нельзя: в промышленных волокнах для длины волны 1550 нм потери составляют порядка 0.2 дБ/км, что означает затухание сигнала в линии связи в 10 раз на расстоянии 50 км. Для того, чтобы увеличить расстояние передачи, в волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) встраивают активные элементы – такие как полупроводниковые оптические усилители (ПОУ) – увеличивающие амплитуду сигнала. Помимо изменения амплитуды оптических импульсов, распространение по ВОЛС связано с искажением формы огибающей из-за насыщения усиления в ПОУ и из-за дисперсии групповой скорости, влияющей на импульсы как в волокне, так и в ПОУ. В настоящей работе мы исследуем возможность восстановить форму сигнала, прошедшего ВОЛС, состоящую из чередующихся участков волокна и ПОУ, скомпенсировав при этом искажения, внесенные только дисперсией волокна.

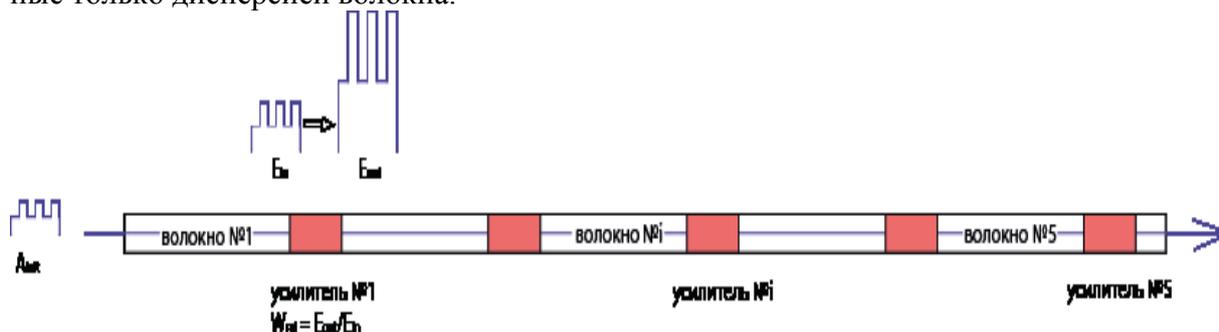


Рис. 1 Модель линии связи. Белые участки - волокно. Красные элементы – ПОУ.

Усиление лазерного излучения в ПОУ описывается системой уравнений [1, 2] для инверсии населенностей $N(t, z)$ и огибающей поля $A(t, z)$:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{a(N - N_0)}{\hbar\omega_0} |A|^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{1}{2} [(1 - i\sigma)a(N - N_0) - \alpha_{\text{int}}] A \quad (2)$$

Здесь t – время, z – координата распространения, I – ток накачки, V – объем активной области, q – заряд электрона, a – постоянная усиления, \hbar – постоянная Планка, ω_0 – несущая частота оптических импульсов, τ_c – время релаксации инверсии населенностей, N_0 – инверсия, обеспечивающая режим прозрачности активной среды, v_g – групповая скорость, α_{int} – коэффициент внутреннего поглощения, σ – отношение показателя преломления и усиления.

Распространение импульса по волокну считается линейным и определяется уравнением, в котором учтена дисперсия β и поглощение волокна γ :

$$\frac{\partial A(t, z)}{\partial z} = - \left(\frac{i}{2} \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \gamma \right) A(t, z) \quad (3)$$

Мы моделировали распространение по ВОЛС квадратурно-модулированного сигнала, в котором информация кодирована амплитудой и фазой оптического поля таким образом, что вещественная и мнимая части огибающей поля, нормированные на максимум, независимо принимают одно из 4 значений: $A_{re}^{(k)}, A_{im}^{(k)} \in \{1, 1/3, -1/3, -1\}$. Таким образом, один импульс представляет одно из 16 состояний поля и тем самым кодирует 4 бита информации. Квадратурно-модулированный сигнал в этой задаче состоял из 128 импульсов, t_p – длительность одного импульса:

$$A(t) \propto \sum_{k=-64}^{63} (A_{re}^{(k)} + iA_{im}^{(k)}) \exp \left[-\frac{1}{2} (t - t_p k)^{10} \right] \quad (4)$$

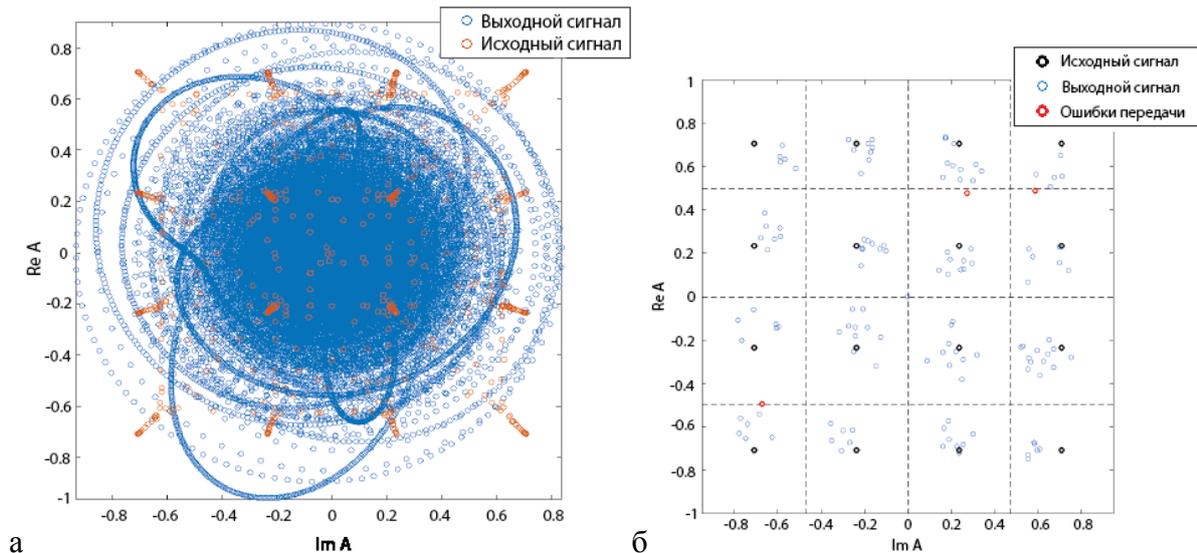


Рис. 2 (а) Годограф поля до и после прохождения линии связи без компенсации дисперсии волокна. (б) Годограф после оцифровки исходного сигнала (чёрная легенда) и искаженного в ВОЛС с компенсацией дисперсии волокна (синяя легенда), биты, переданные с ошибкой (красная легенда)

Для ПОУ с параметрами: $\Delta\Omega = 63$ ТГц (ширина полосы усиления), $\tau_c = 200$ пс (время релаксации N), $G_0 = \exp(L(g_0 - \alpha_{\text{int}})) = 8100$ (интегральное усиление, где g_0 – усиление ненасыщенного ПОУ) был проведен анализ искажения временной формы

огибающей поля от мощности и длительности импульсов. Вносимые дисперсией активной среды и насыщением усиления искажения незначительны при длительности каждого импульса в квадратурно-модулированном сигнале более 4 пс и мощности менее 7.8 мкВт. При таких параметрах проведено моделирование распространения по ВОЛС, состоящей из пяти участков волокна длиной 5 км, чередующихся с ПОУ, которые компенсируют потерю энергии в волокне. В сигнале, получившемся на выходе линии связи (см. годограф на рис. 2а) была компенсирована линейная дисперсия волокна, в результате чего получен годограф (рис. 2б). Можно сказать, что искажения, вносимые ПОУ, незначительно сказываются на годографе: при оцифровке сигнала ошибка в передаче не превышает 3%, что может быть компенсировано при использовании помехоустойчивых протоколов передачи информации.

Литература

- [1] Agrawal G. P., Olsson N. A. IEEE J. Quantum Electronics 25(11), 229 (1989).
 [2] Agrawal G. P. IEEE J. Quantum Electronics 27(6), 1843 (1991).

ЭРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ 300 МГц

Зверев А.Д.^{1,*}, Камынин В.А.¹, Цветков В.Б.¹, Сверчков С.Е.¹, Вельмискин В.В.², Денкер Б.И.¹, Гладуш Ю.Г.³, Насибулин А.Г.^{3,4}

¹ ИОФ им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Россия

² НЦ волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН, Россия

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁴ Университет Аалто, Эспоо, Финляндия

*E-mail: izverevad@gmail.com

Волоконные лазеры с высокой частотой повторения ультракоротких импульсов используются для генерации суперконтинуума [1], входят в состав источников терагерцового излучения [2], используются в микроскопии высокого разрешения [3] и планируются к применению в перспективных широкополосных системах связи [4]. Стандартные активные волокна и волоконные компоненты не позволяют получить основную частоту следования импульсов существенно выше 100 МГц. Увеличение основной частоты следования импульсов возможно за счет уменьшения длины резонатора лазера. Для этого используют волокна малой длины с высокой концентрацией активных ионов и гибридные компоненты.

В представленной работе проводилось исследование кольцевого волоконного эрбиевого лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод. Схема установки изображена на рисунке 1. В качестве активной среды мы использовали 12 см композитного волокна с сердцевинкой из фосфатного стекла с высокой концентрацией ионов эрбия и кварцевой оболочкой. Композитное волокно встречно накачивалось через гибридный (каплер, WDM, изолятор) диодом на длине волны излучения 980 нм. Деление каплера составляло 85/15 (15% выход). Пассивную синхронизацию мод обеспечивали помещенные между двумя оптическими разъемами FC/APC синтезированные в аэрозоле одностенные углеродные нанотрубки (SWCNT [5]).

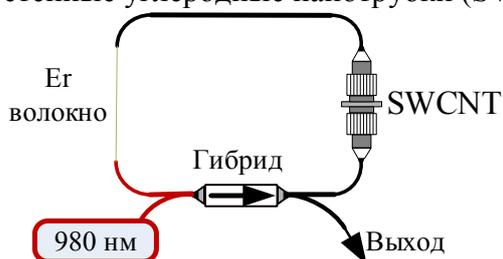


Рисунок 1. Схема волоконного эрбиевого лазера. SWCNT – соединённые ферулы, между которыми находятся нанотрубки; Гибрид – волоконный элемент, сочетающий в себе свойства мультиплексора, изолятора и оптического делителя (каплер). Красным цветом показано направление накачки

В данной схеме за счет гибрида и композитного волокна при укорочении длины резонатора до минимально возможной (ограничения по минимальной длине свариваемых компонент), общая длина резонатора не превышала 60 см. При мощности накачки 365 мВт удалось получить стабильный режим пассивной синхронизации мод с генерацией импульсов на частоте обратной времени обхода резонатора – 298.5 МГц (рисунок 2 (г)). Мощность излучения на выходе составляла 1.64 мВт. Лазер генерировал ультракороткие импульсы с автокорреляционной функцией длительностью 3.8 пс (рисунок 2 (б)) на центральной длине волны 1543 нм. Ширина спектра составляла 1.3 нм (рисунок 2 (в)). Временные и спектральные характеристики выходного излучения показаны на рис. 2.

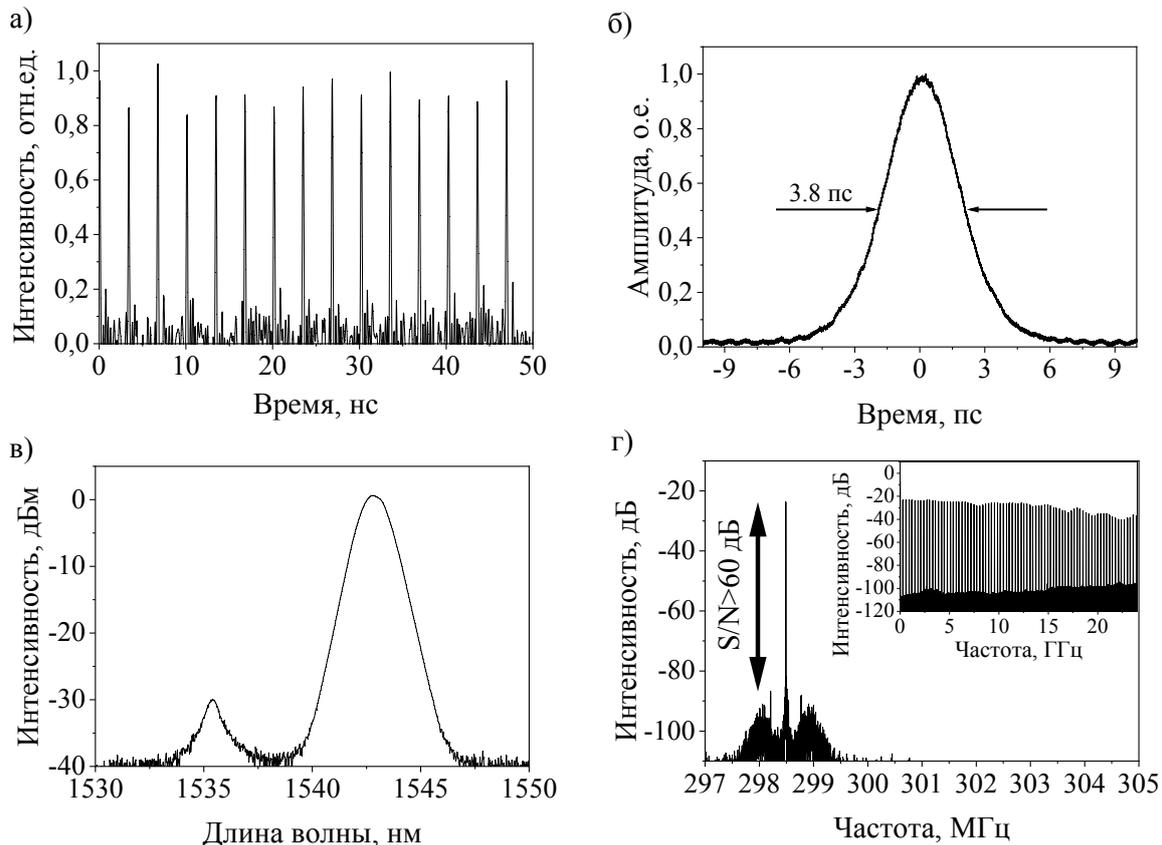


Рисунок 2. (а) – осциллограмма; (б) – автокорреляционная функция; (в) – спектр; (г) – радиочастотный спектр.

Таким образом нам удалось реализовать схему эрбиевого волоконного лазера с высокой частотой повторения ультракоротких импульсов (~300 МГц), который обладает хорошей стабильностью работы и генерирует последовательность импульсов с соотношением сигнал/шум ($S/N > 60$ дБ).

Литература

- [1] Sobon, Grzegorz, et al. "Infrared supercontinuum generation in soft-glass photonic crystal fibers pumped at 1560 nm." *Optical Materials Express* 4.1 (2014): 7-15.
- [2] Lohner, A., P. Kruck, and W. W. Rühle. "Generation of 200 femtosecond pulses tunable between 2.5 and 5.5 μm ." *Applied Physics B* 59.2 (1994): 211-213.
- [3] Potma, Eric O., et al. "High-sensitivity coherent anti-Stokes Raman scattering microscopy with two tightly synchronized picosecond lasers." *Optics letters* 27.13 (2002): 1168-1170.
- [4] Lee, W., et al. "Coherent optical communications & signal processing using optical frequency combs." *Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, 2005. IEEE, 2005.*
- [5] Kaskela A. et al. Aerosol-synthesized SWCNT networks with tunable conductivity and transparency by a dry transfer technique // *Nano letters*. – 2010. – Т. 10. – №. 11. – С. 4349-4355.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД

Калашников В. А.

С-Пб. ПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vitea18092001@gmail.com

В условиях ухудшения качества топлива и объемов его потребления важной задачей является разработка надежных систем контроля [1, 2]. Одной из таких систем являются спектральные анализаторы [2]. Основной функцией спектрального анализа является регистрация и накопление спектра света, оцифровка полученного сигнала в зависимости от длины волны и последующий анализ с помощью персонального компьютера. Спектрометр представляет собой систему визуализации, распределяющую множество монохроматических изображений в плоскости детектора (через входную щель). Параметры щели влияют на рабочие характеристики спектрометра – оптическое разрешение, пропускная способность. Дифракционная решетка формирует спектр длин волн света и частично влияет на оптическое разрешение спектрометра. Количество штрихов влияет на величину дисперсии. Диапазон длин волн спектрометра обратно пропорционален дисперсии решетки благодаря фиксированной геометрии. Чем шире дисперсия, тем выше разрешение спектрометра.

При работе с углеводородными средами, в частности с бензином и дизельным топливом, исследуемый образец облучается рентгеновской трубкой. В результате взаимодействия рентгеновского излучения с веществом в исследуемом образце возникает вторичное флуоресцентное излучение, в спектре которого присутствуют характеристические линии тех элементов, которые входят в состав образца. Наличие в спектре линий данного элемента свидетельствует о присутствии его в образце, а интенсивность этих линий позволяет судить о концентрации элементов. Принцип действия анализатора основан на последовательном выделении кристаллом-анализатором характеристической линии флуоресцентного излучения серы и фонового излучения исследуемого образца, возбуждаемого излучением рентгеновской трубки, регистрации интенсивности линий и фона. Это реализуется за счет поворота угла кристалла-анализатора относительно угла α . Особенностью данного исследования является получение максимального значения интенсивности отраженного от кристалла-анализатора анализатора излучения за счет точной настройки на угол полного внутреннего отражения. В этом случае, возникает еще одна особенность проведения исследований углеводородных сред. Эта особенность связана с тем, что исследуемое топливо может быть смесью нескольких углеводородных сред в различных пропорциях. В этом случае в исследуемой смеси линии спектра располагаются достаточно близко относительно друг друга и можно при «грубой» перестройки угла α не получить необходимое разрешение. Для решения этой задачи была модернизирована схема рентгенооптическая анализатора на основе проведенных мною исследований различных углеводородных смесей (например, смеси из двух бензинов Аи-92 и Аи-95 в различных концентрациях, смесь дизельного топлива с бензином Аи-92 и прочие). Формирование такой смеси возможно при перевозке топлива, когда из цистерны не слили все топливо и потом добавили другое. При движении «танкера» среды перемешиваются и образуется смесь. Такое топливо в ряде случаев использовать не рекомендуется.

На рис. 1 представлена структурная схема рентгенооптическая анализатора и ход рентгеновских лучей. Первичное излучение (3) возбуждает в исследуемом образце (1) флуоресцентное излучение, которое через окно (2) измерительно камеры и через входную щель (7) попадает на фокусирующий кристалл-анализатор (6), выделяющий из спектра образца характеристическую линию, соответствующую условиям отражения по закону Вульфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d \sin \alpha$$

где n – порядок отражения ($n = 1, 2, \dots$), λ – длина волны падающего излучения, d – межплоскостное расстояние кристалл-анализатора, α – угол падения излучения на кристалл.

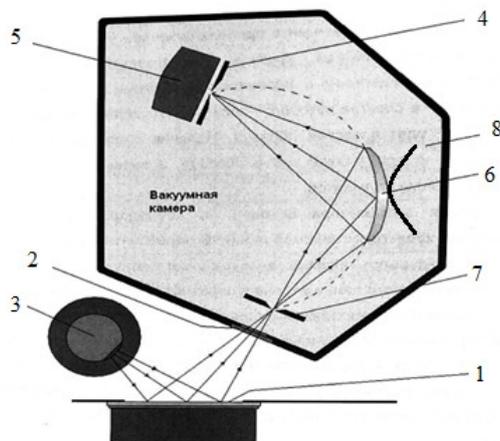


Рисунок 1. Структурная схема анализатора: 1 – исследуемый образец, 2 – входное окно, 3 – рентгеновская трубка, 4 – приемная (выходная) щель, 5 – блок детектирования, 6 – кристалл-анализатор, 7 – входная щель, 8 – регулировочная площадка

Выделенное излучение кристалл-анализатора (6) фокусирует в приемную щель (4) блока детектирования (5), сигнал с которого поступает на вход усилителя-дискриминатора, детектирования (5), сигнал с которого поступает на вход усилителя-дискриминатора, затем на вход счётного устройства.

Для доработки данного анализатора была добавлена регулировочная площадка, которая механическим способом может менять угол, при котором свет попадает на образцы. Такая добавленная часть может существенно увеличить диапазон регистрируемых значений.

На рис. 2 представлен зарегистрированный спектр от бензина Аи-92.

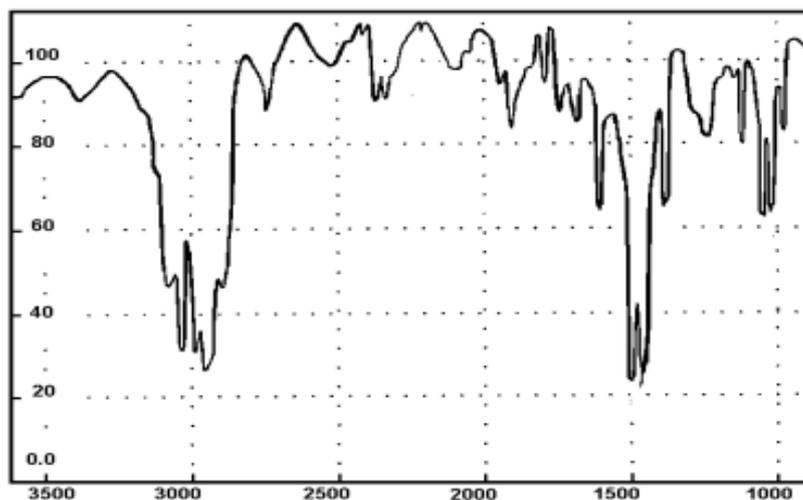


Рисунок 2. Спектр бензина Аи-92

Литература

1. Kashaev R.S., Kien N.C., Tung T.V., Kozelkov O.V. Fast Proton Magnetic Resonance Relaxometry Methods for Determining Viscosity and Concentration of Asphaltenes in Crude Oils *Journal of Applied Spectroscopy*, 2019, vol. 86(5), pp. 890–895. <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00911-4>.
2. Bocian, P.; Biernat, K.; Matuszewska, A.; Bukrejewski, P.; Noworyta, K.R. Electrochemical impedance spectroscopy studies of gasoline oxidative stability – Attempt to devise new gasolines chemical stability index. *Fuel* 2021, 288, 119620. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119620>

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ФОТОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ И МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОЛЕНТ ГРАФЕНА

Карамышева С.П., Резник И.А., Тимкина Ю.А., Рамазанова В.Р.,
Орлова А.О.

Университет ИТМО, факультет фотоники, Санкт-Петербург, Россия
spkaramysheva@itmo.ru

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) являются перспективным материалом для использования их в микро- и наноэлектронике, сенсорике, в фотовольтаике и био-медицине [3]. Квантовые точки тройных соединений, AgInS_2 (AIS) и CuInS_2 (CIS), в последнее время всё чаще замещают токсичные классические КТ при разработке сенсоров в комбинации с графеном и его производными [1,2]. В данной работе рассматриваются оптические и электрические свойства потенциального фотоэлектрохимического сенсора с мультипараметрическим сигналом, в основе которого лежит гибридная структура (ГС), состоящая из многостенных нанолент графена (МНГ) и полупроводниковых КТ $\text{CuInS}_2/\text{ZnS}$ (CIS/ZnS), нанесённая на полевой транзистор.

Установление закономерностей фотофизических и фотоэлектрических свойств ГС является важной ступенью на пути к разработке эффективного сенсорного устройства. Для этого требуется изучение взаимодействия CIS/ZnS КТ с МНГ в зависимости от концентрации основных носителей зарядов в области МНГ в системе полевого транзистора. Исследования люминесцентных свойств ГС показало, что интенсивность люминесценции CIS КТ в слоях, нанесённых на поверхность многослойных нанолент графена, уменьшилась почти в пять раз в сравнении с аналогичными слоями, нанесёнными на диэлектрические подложки. При этом характерные времена затухания люминесценции КТ уменьшились с 19, 91 и 309 нс до 8, 54 и 227 нс соответственно. Изменение стационарных и временно-разрешённых люминесцентных откликов КТ при переходе от диэлектрической подложки к ГС ясно свидетельствуют на эффективную передачу энергии/заряда от КТ к графену в составе ГС. Наличие эффективного канала передачи энергии/заряда от CIS КТ к графену позволяет ожидать заметного изменения проводимости ГС под действием электромагнитного излучения, эффективно поглощаемого КТ и, как результат, потенциального увеличения чувствительности ГС при обнаружении аналитов в сравнении с многослойными нанолентами графена.

Анализ фотоэлектрических свойств ГС показал, что увеличение напряжения смещения на затворе от 0 до +40 В приводит к трехкратному уменьшению темновой проводимости и исчезновению фотоотклика при освещении ГС светом, эффективно поглощаемым CIS КТ. Это свидетельствует об эффективном «запирании» проводящего слоя. При этом, изменение напряжения смещения на затворе от 0 до -40 В сопровождается увеличением темновой проводимости ГС на 20% и восьмикратным увеличением амплитуды фотоотклика. В рассматриваемой ГС согласно данным электронной микроскопии толщина слоя многослойных нанолент графена составляет порядка 500 нм. В этом случае изменение напряжения смещения на затворе, скорее всего, влияет на расположение дефектных уровней в графеновых нанолентах и никак не влияет на увеличение или уменьшение эффективности поглощения электромагнитного излучения монослоем CIS КТ. Поэтому, наблюдаемые зависимости фотоотклика от напряжения смещения на затворе может указывать на изменение эффективности переноса заряда (дырки) от КТ к графеновым нанолентам в результате смещения во внешнем электрическом поле дефектных уровней в графене.

Полученные зависимости фотофизических и фотоэлектрических свойств гибридной структуры на основе CIS/ZnS КТ и многослойных нанолент графена, находящейся в электрических полях различной напряженности, будут использованы для создания нового поколения нетоксичных высокоэффективных фотоэлектрохимических сенсоров,

различающих три вида сигнала: темновую проводимость, фотопроводимость и изменение люминесцентных свойств ГС.

Литература

1. Liu Z. et al. A novel aptamer-mediated CuInS₂ quantum dots@graphene oxide nanocomposites-based fluorescence “turn off-on” nanosensor for highly sensitive and selective detection of kanamycin // RSC Advances. Royal Society of Chemistry, 2016. Vol. 6, № 12. P. 10205–10214.
2. Maluleke R., Sakho E.H.M., Oluwafemi O.S. Aqueous synthesis of glutathione-capped CuInS₂/ZnS quantum dots-graphene oxide nanocomposite as fluorescence “switch OFF” for explosive detection // Materials Letters. Elsevier B.V., 2020. Vol. 269. P. 127669.
3. Reshma V.G., Mohanan P. v. Quantum dots: Applications and safety consequences // Journal of Luminescence. 2019. Vol. 205. P. 287–298.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАХ НАТРИЯ

Карасев Н.В., Суханов В.Б., Тригуб М.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

E-mail: nvk@iao.ru

Испускаемый спектр натрия, как и любого другого щелочного металла, имеет несколько серий, характеризующихся переходом не только в основное состояние, но и между возбужденными состояниями [1]. Объясняется это теорией переноса резонансного излучения [2]. Кроме того, интерес представляет генерация на двухатомных молекулах Na₂ [3], доля которых не превышает нескольких процентов.

Однако для наблюдения линий переходов между возбужденными состояниями необходимы высокие температуры и высокая концентрация паров активного вещества [3]. При сравнительно невысоких температурах наблюдение подобных линий невозможно, т.к. в холодных парах практически присутствуют только атомы в основном состоянии [4]. Что касается двухатомных молекул, то их концентрация возрастает с ростом температуры и концентрации активного вещества. Поэтому ключевой задачей является поиск эффективных способов нагрева паров натрия до достаточно высоких температур (порядка 700 градусов). В качестве перспективного метода повышения температуры и, как следствие, концентрации паров активного вещества предлагается использование индукционного нагрева. Для практической проверки данного способа необходимо разработать лазерную кювету особой конструкции.

Внешне кювета представляет собой колбу из кварцевого стекла с четырьмя выходными окнами для обеспечения поперечной накачки. Внутри кюветы расположен небольшой тигель из нержавеющей стали, в который помещается натрий. Для лучшего теплоотвода фланцы выходных окон так же выполнены из стали. Разогрев тигля происходит с помощью индуктора, подключенного к индукционному нагревателю. Сразу следует отметить эффективность подобного способа нагрева по сравнению с резистивным, поскольку нагревается непосредственно тигель с активным веществом, а не корпус кюветы. Сама же кювета практически не требует дополнительных систем охлаждения, достаточно организовать обдув, в то время как температура стенки тигля может достигать 1000 °С. Это существенно упрощает общую конструкцию и, как следствие, повышает ее надежность.

В ходе испытаний было получено спонтанное излучение на парах натрия, отмечена высокая его интенсивность. Следует отметить, что применение индукционного нагревателя значительно ускорило нагрев активного вещества. Готовность системы к работе

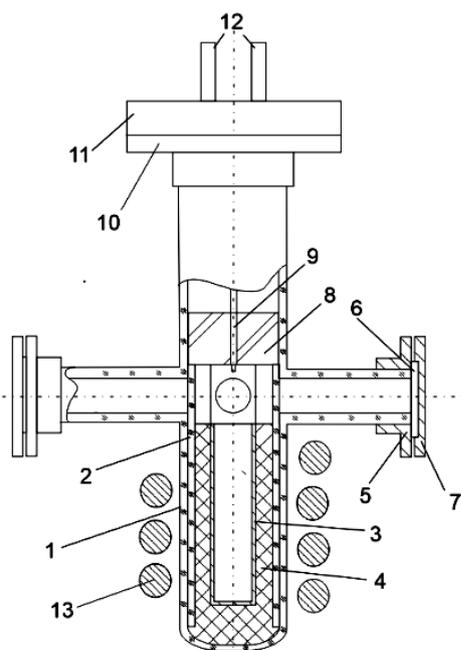


Рис. 1. Внешний вид кюветы: 1 – корпус кюветы (стекло); 2 – капсула (стекло); 3 – тигель (сталь); 4 – прослойка из каолиновой ваты; 5 – фланец выходного окна (сталь); 6 – стекло выходного окна; 7 – крышка выходного окна (сталь); 8 – пробка из шамотного кирпича с встроенной термопарой (9); 10 – фланец верхней крышки (сталь); 11 – верхняя крышка из фторопласта; 12 – выводы термопары; 13 – индуктор

обеспечивается уже спустя три минуты после включения нагревателя. Однако следствием столь быстрого нагрева тигля может стать неравномерный прогрев кюветы, что, в свою очередь, приведет к осаждению натрия на стенках кюветы. Поэтому дальнейшее совершенствование конструкции будет связано с поиском и реализацией механизмов плавного управления системой нагрева

Работа выполнена при поддержке гранта РФ №19-79-10096.

Литература

1. Одинцова Г. А., Стриганов А. Р. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов / М.: Энергоатомиздат, 1982, с. 893.
2. В.М. Ямщиков, В.Г. Рогачев, Е.А. Кудряшов, Г.Н. Качалин Перенос и пленение резонансного излучения в двухуровневой системе // Оптика и спектроскопия. – 2020, т. 128, №8, с. 1160 – 1164.
3. Руденко А.А. Экспериментальное исследование спектров испускания и поглощения плотных паров натрия: автореферат дис. канд. техн. наук: 01.04.08 / Моск. физ.-техн. ин-т. - 17 с.
4. С. И. Канорский, В. М. Каслин, О. Ф. Якушев, Na₂-лазер с оптической накачкой // Квантовая электроника, 1980, т. 7, № 10, с. 2201–2203.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Кожевникова А.М., Алексеенко И.В.

*Балтийский ФУ имени И.Канта, образовательно-научный кластер
«Институт высоких технологий», Калининград, Россия*

E-mail: Amkozhevnikova1@kantiana.ru, Ialekseenko@kantiana.ru

В работе представлен метод стробоскопической голографической интерферометрии для исследования параметров плазмы искрового разряда, генерируемой в импульсном режиме при атмосферном давлении. Описываемая работа является частью проекта по исследованию параметров низкотемпературной плазмы, инициируемой в газовой среде, которая может использоваться для медицинских приложений, например, для лечения кожных заболеваний и дерматитов [4, 7]. Предлагается в качестве основного параметра плазмы рассматривать концентрацию электронов. Известно, что изменение concentra-

ции электронов в плазме меняет ее показатель преломления, а использование методов цифровой голографической интерферометрии позволяет проводить оценку концентрации электронов в плазме через соотношение показателя преломления среды с разностью фаз зарегистрированных электромагнитных волн:

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{l_2}^{l_1} [n(x, y, z) - n_0] dz,$$

где λ – длина волны излучения лазера; n_0 – показатель преломления наблюдаемой среды в ее начальном состоянии; $n(x, y, z)$ – конечное распределение показателя преломления.

Связь же разности фаз с концентрацией электронов в плазме, как показано в [5], будет иметь вид:

$$N_e = 2,2 \times 10^{13} \frac{\Delta\varphi}{2\pi l \lambda},$$

где l – длина пути света в исследуемой среде.

Плазма искрового разряда была выбрана для отработки методики эксперимента, поскольку ее легко можно получить в нормальных условиях с ожидаемо большей электронной концентрацией, чем в плазменной струе.

Методы голографической интерферометрии хорошо известны и применяются для исследования прозрачных (фазовых) объектов, в том числе плазмы [1, 3, 5]. Однако, большинство результатов по исследованию плазмы продемонстрированы как результаты работы методами аналоговой голографии, в то время как цифровые методы регистрации изображений и современные возможности синхронизации быстропротекающих импульсных процессов могут позволить получить больше информации о такого рода объектах. Основной целью исследования было определение концентрации электронов в плазменном канале в различные моменты времени от начала искрового пробоя до его завершения. Во многом, результативность работы зависит от точности синхронизации процессов, поэтому для этих целей была разработана программно-аппаратная схема автоматизации эксперимента, которая позволила провести сканирование всего разряда по мере его развития.

На рисунке 1 продемонстрированы результаты регистрации искрового разряда методами цифровой голографической интерферометрии, а также представлены значения разности фаз вдоль выделенных на рисунке 1а координат. На графиках видно, что фазовый контраст увеличивается при приближении к электроду, что соответствует увеличению электронной концентрации вблизи электродов [2, 6].

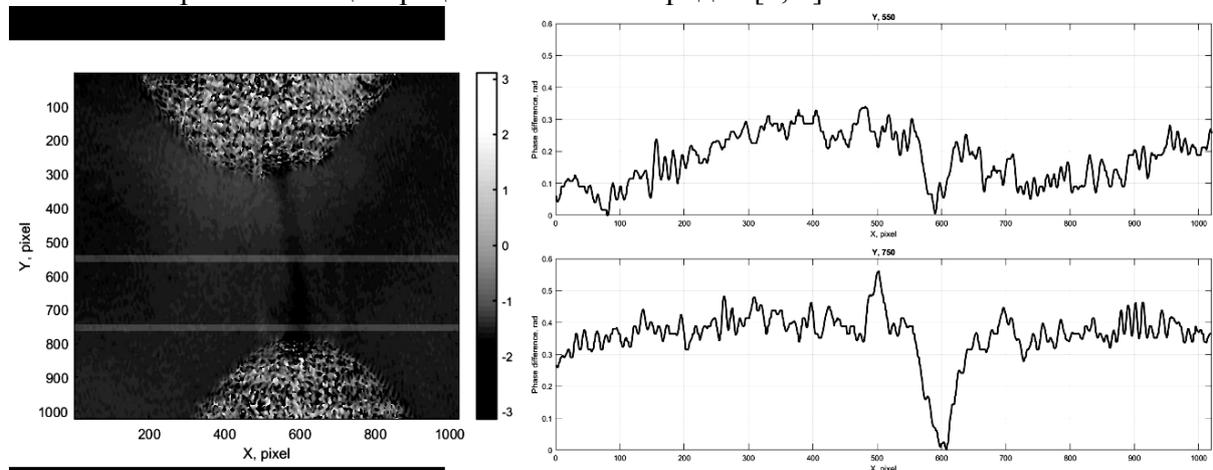


Рисунок 1. Результаты эксперимента по регистрации искрового разряда; а – интерференционная картина разности фаз со скомпенсированными тепловыми эффектами в поле наблюдения; б – графическое представление разности фаз вдоль оси X в значениях $(x, y) = (0; 1020, 550)$ и $(x, y) = (0; 1020, 750)$.

Используемая в работе методика регистрации плазмы позволит в дальнейшем провести оценку параметров низкотемпературно плазмы, инициируемой в потоке газа.

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Минобрнауки РФ №FZWM-2020-0003 «Исследование новых материалов и методов плазмо- и фототерапии онкологических заболеваний, дерматитов и септических осложнений» 2020-2023 гг.

Литература

1. Вовченко Е. Д., Кузнецов А. П., Савелов А. С. Лазерные методы диагностики плазмы //М.: МИФИ. – 2008. – Т. 1. – С. 3.
2. Жданов, С. К., Курнаев, В. А., Романовский, М. К., & Цветков, И. В. (2000). Основы физических процессов в плазме и плазменных установках //М.: МИФИ. – 2000. – Т. 184.
3. Зайдель, А. Н. (1986). Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы. *Успехи физических наук*, 149(5), 105-138.
4. Ivankov A. S. et al. Investigation of Nonthermal Plasma Jet Excitation Mode and Optical Assessment of Its Electron Concentration //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 19. – С. 9203.
5. Ostrovskaya G. V., Ostrovsky Y. I. IV Holographic Methods of Plasma Diagnostics //Progress in optics. – Elsevier, 1985. – Т. 22. – С. 197-270.
6. Samusenko A. V., Stishkov Y. K. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. – 2012.
7. Weltmann K. D. et al. Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine //Pure and Applied Chemistry. – 2010. – Т. 82. – №. 6. – С. 1223-1237.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ПОТЕНЦИАЛА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ НА РЕЛАКСАЦИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИИ

Кондратьев И. М.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: kondratev-ildar@yandex.ru

Большинство новых сцинтилляционных материалов представляют собой смешанные кристаллы в форме твердых растворов. Смешанные кристаллы с концентрацией компонентов в диапазоне от 20 до 80% часто демонстрируют более высокий световой выход и лучшее энергетическое разрешение по сравнению с исходными составляющими кристаллами. Они также показывают более низкий уровень компонентов кинетики медленного затухания и меньшее послесвечение [1].

Наиболее изучены твердые растворы полупроводников, однако твердые растворы широкозонных диэлектрических кристаллов изучены слабее. В диэлектриках длина свободного пробега электронов относительно рассеяния на фонах меньше нанометра, поэтому возможная наноструктурная кластеризация твердого раствора и связанные с ней флуктуации экстремумов зон существенно влияют на динамику носителей. Световой выход, кинетика затухания и энергетическое разрешение сцинтилляторов определяются стадиями создания, релаксации, миграции и рекомбинации вторичных возбуждений, возникающих в следе ионизирующей частицы. Неоднородность твердых растворов в нанометровом масштабе изменяет по крайней мере три последних стадии сцинтилляционного процесса. Целью исследования является моделирование флуктуаций потенциала и оценка влияния этого эффекта на сцинтилляционные свойства твердых растворов. Основой исследования являлось моделирование по методу Монте-Карло пространственного распределения компонент твердого раствора с учетом возможных корреляций в расположении ионов [2]. Моделирование проводилось для суперячейки кристалла $\text{Sc}_x\text{Y}_{1-x}\text{PO}_4$ в суперячейке $20 \times 20 \times 20$ постоянных решетки с периодическими гранич-

ными условиями. Во внимание принималось реальная кристаллическая структура твердого раствора с несколькими неэквивалентными положениями катионов в элементарной ячейке. В связи с тем, что запрещенные зоны ScPO_4 и YPO_4 отличаются почти на 1 эВ, в таком твердом растворе можно ожидать образования глубоких потенциальных ям.

В результате анализа результатов моделирования сделаны предположения, каким образом структура твердого раствора влияет на эффективность его сцинтилляционных свойств. Полученные с помощью модели твердого раствора данные и их сравнение с экспериментом [3] подтверждают, что структура твердого раствора замещения сильно влияет на сцинтилляционные свойства широкозонных диэлектрических кристаллов. Модель позволяет изучать влияние беспорядка замещения на потенциал, действующий на электронные возбуждения при их миграции по кристаллу, и дает примерные количественные оценки различных характеристик, которые позволяют объяснить сцинтилляционные особенности твердых растворов беспорядка на основе диэлектрических кристаллов с широкой запрещенной зоной.

Литература

1. A.V. Gektin, A.N. Belsky, A.N. Vasil'ev, IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014, Vol. 61, p. 262.
2. A. Belsky, A. Gektin, A. N. Vasil'ev. Influence of disorder in scintillating solid solutions on thermalization and recombination of electronic excitations, Physica Status Solidi (b), Vol. 257 (8), 2019.
3. D. Spassky, A. N. Vasil'ev, V. Nagirnyi, I. Kudryavtseva, D. Deyneko, I. Nikiforov, I. Kondratyev, B. Zadneprovski. Bright UV-C Phosphors with Excellent Thermal Stability – $\text{Y}_{1-x}\text{Sc}_x\text{PO}_4$ Solid Solutions, Materials, Vol. 15 (19), 2022.

REDUCING LASER PHASE NOISE FOR ENHANCED FIDELITY IN RYDBERG GATES

Kour Navjeet^{1,2}, Svirsky Daniil^{2,3}, Lomov Evgeny³

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

²Russian Quantum Center, Moscow, Russia

³Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

E-mail: navjeetkour@phystech.edu, daniilsvirskiy@gmail.com,

lomov.ev17@physics.msu.ru

Quantum computing holds the potential to solve complex computational problems that classical methods are incapable of resolving [1]. However, a substantial number of logical qubits are needed for the actual implementation of quantum algorithms, and this necessitates a large improvement in quantum gate fidelities. Single atoms in optical traps is one of the promising platforms for quantum computing. This system has long coherence times, high-fidelity single qubit gates, and beyond nearest neighbors' connectivity.

Most proposals for high-fidelity two-qubit gates for neutral atoms rely on strong interaction in highly excited Rydberg states. The excitation is typically achieved through the use of laser light. However, the presence of laser noise greatly impacts the quality, reducing efficiency and accuracy of coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states. The noise arises due to instabilities in the laser source, phase drifts in the optical path, and technical limitations in the laser control and stabilization systems [2]. In order to minimize the effect of laser phase noise and improve the coherence of Rydberg excitation, we propose to use high-finesse filtering cavities.

We discuss a design and perform a preliminary test of a tunable filter cavity to explore the impact of finite phase noise in excitation lasers on the damping of oscillations in a Rydberg atom system. The experimental setup uses two extended-cavity diode lasers and locks the phases using the Pound-Drever-Hall technique [2]. We have performed simulations to validate our estimate of the phase noise and its effect on the system, which gives us the finesse of

30,000 approximately. The cavity parameters are characterized by cavity ringdown spectroscopy and compared to a numerical model considering diffraction and scattering losses.

Note: I am grateful to my supervisor and his team for their invaluable guidance and support throughout this project.

References:

- [1]. Brun, T.A. (2011). Quantum Computing. In: Blum, E., Aho, A. (eds) Computer Science. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1168-0_14
- [2]. De Leseleuc, Sylvain & Barredo, Daniel & Lienhard, Vincent & Browaeys, Antoine & Lahaye, Thierry. (2018). Analysis of imperfections in the coherent optical excitation of single atoms to Rydberg states. Physical Review A. 97. 10.1103/PhysRevA.97.053803.

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРИТЕЛЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК

Корепанова А.А.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия
E-mail: korepanova.aa20@physics.msu.ru*

В настоящее время в нанотехнологиях, в диагностике различных наносистем, в том числе, в биомедицине крайне актуальна задача создания и развития оптических сенсоров для определения различных физико-химических параметров окружающей среды. Наносенсоры на основе углеродных точек (УТ) являются одним из наиболее перспективных материалов для решения указанных задач благодаря таким свойствам, как стабильная фотолюминесценция, чувствительность к среде, нетоксичность, биосовместимость, низкая стоимость, простота синтеза и большое разнообразие прекурсоров [1]. Однако для разработки эффективных наносенсоров на базе УТ необходимо изучить механизмы взаимодействия наночастиц с молекулами окружения и механизмы влияния этих взаимодействий на спектральные характеристики УТ [2].

В данной работе изучаются оптические свойства УТ, синтезированных гидротермальным методом из лимонной кислоты и этилендиамина и методом Хаммерса из пластинок графита, в различных растворителях. Для исследования механизмов влияния взаимодействий УТ с молекулами растворителя на оптические свойства наночастиц были получены зависимости спектральных характеристик поглощения и фотолюминесценции суспензий УТ от таких свойств использованных растворителей, как относительная полярность, показатель преломления и способность к образованию водородных связей. Сравнительный анализ спектров поглощения и фотолюминесценции суспензий УТ показал, что величина стоксова сдвига фотолюминесценции возрастает с ростом относительной полярности растворителя. Такой результат объясняется процессом перераспределения электронов в молекулах растворителя при увеличении дипольного момента УТ вследствие возбуждения. Обнаружена зависимость интенсивности фотолюминесценции суспензии УТ от способности растворителя образовывать водородные связи.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-12-00138, <https://rscf.ru/project/22-12-00138/>.

Литература

1. Liu M. Optical Properties of Carbon Dots: A Review // Nanoarchitectonics. 2020, V. 1(1). P. 1–12.
2. Lakowicz J. R. (Ed.). Principles of Fluorescence Spectroscopy. 2006.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ РАССЕЙЯНИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ ФОТОНОВ НА СПИРАЛЬНЫХ СРЕДАХ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Королев П.С.

Национальный исследовательский Томский ГУ, Томск, Россия

E-mail: kizorph.d@gmail.com

В недавней работе [1] было продемонстрировано, что спирально-симметричные среды передают рассеянному фотону орбитальный угловой момент. Возбуждения электромагнитных полей с ненулевым орбитальным угловым моментом называют закрученными фотонами [2]. Однако применение естественных спиральных сред (таких, как холестерические жидкие кристаллы [3]) ограничено. В то же время, спиральной симметрией обладают композитные материалы, составленные из спиральных проводящих проводков [4]. Такие материалы проще создавать, и они менее восприимчивы к внешним условиям, в то же время, проводящая структура приводит к появлению резонансной структуры рассеяния. Однако наличие пространственной дисперсии таких сред не позволяет полноценно использовать теорию, развитую в [1].

В данной работе исследуются электромагнитные свойства спиральных сред с пространственной дисперсией. В рамках квантовой электродинамики поставлена и решена задача рассеяния плоских и закрученных фотонов на плоско-параллельной пластине. Исследовано дисперсионное соотношение, выявлено наличие как киральных, так и полных запрещенных зон. Раскрыта резонансная структура рассеяния. Показано, что такие материалы могут быть использованы для создания компактного устройства генерации закрученных фотонов и сдвига их углового момента в широком спектральном диапазоне.

Литература

1. Kazinski P. O., Korolev P. S. Scattering of plane-wave and twisted photons by helical media //Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2022. – Т. 55. – №. 39. – С. 395301.
2. Erhard M. et al. Twisted photons: new quantum perspectives in high dimensions //Light: Science & Applications. – 2018. – Т. 7. – №. 3. – С. 17146-17146.
3. De Gennes P. G., Prost J. The physics of liquid crystals. – Oxford university press, 1993. – №. 83.
4. Morgado T. A., Maslovski S. I., Silveirinha M. G. Uniaxial indefinite material formed by helical-shaped wires //New Journal of Physics. – 2012. – Т. 14. – №. 6. – С. 063002.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ ФРЕСОК ИЗ ХРАМОВ ВЕЛИКОГО НОВГОРОДА МЕТОДОМ МИКРОСПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ

Кочетков М.И. *, Кононова Е.М.^{2**}, Анисимова Т.И. **, Брандт Н.Н. *,
Балахнина И.А. *

* МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

** Центр реставрации монументальной живописи, Новгородский государственный
объединённый музей-заповедник, Великий Новгород, Россия

E-mail: kochetkov.mi19@physics.msu.ru

В последнее время всё более широкое применение находят оптические методы для диагностики и исследования предметов искусства. Например, ИК и КР спектроскопии используются для идентификации веществ, составляющих археологические находки и объекты культурного наследия [3-4].

Красочные слои во фресковой живописи гораздо более устойчивы к внешним воздействиям, чем в других техниках. Это обусловлено тем, что пигмент наносится на влажную известковую штукатурку. Таким образом, пигмент встраивается в поверхность стены, и красочный слой становится защищённым. Процесс высыхания штукатурки связан со взаимодействием гашёной извести (гидроксид кальция) с углекислым газом воздуха, что приводит к карбонизации гидроксида кальция с образованием кальция – CaCO_3 , который является основным защитным компонентом фрески.

Великий Новгород – один из центров древнерусского монументального зодчества. Фресковая живопись древних Новгородских храмов представляет большой интерес для археологов, реставраторов и историков. В некоторых храмах, например, в Софийском Соборе, или Церкви Спаса Преображения на Ильине, сохранились примеры древнерусской фресковой живописи. Однако во время своего существования храмы разрушались, достраивались или перестраивались. Фрагменты фресок археологи находят во время раскопок в окрестностях древних построек [1]. Например, во время подводных археологических исследований на месте старого моста на реке Волхов в 2009 и 2011 годах были обнаружены фрагменты штукатурки неизвестной разрушенной церкви со следами фресковой живописи. По предположению археологов, фрагменты, сбитые со стен во время одной из перестроек церкви, были использованы как строительный материал для постройки моста. Результатом искусствоведческого анализа и работы с летописями стала гипотеза о том, что фрагменты являлись частью живописи Софийского Собора и датировались XII веком.

Целью работы являлась идентификация пигментов, использованных в найденных фрагментах фресковой живописи, и их сравнение с известными палитрами, определёнными по результатам исследования образцов фресковой живописи, найденных в окрестностях развалин церкви Благовещения на Городище и так же датированных XII веком [2].

Измерения КР спектров проводилось на конфокальном микроспектрометре DXR Raman с длинами волн возбуждения 532 и 780 нм при использовании объектива LMPlanFL N 50x. Мощность излучения на образце варьировалась от 1 до 24 мВт, размер лазерного пятна на образце составлял 2 мкм, а время накопления одного спектра – от 5 до 30 минут в зависимости от мощности возбуждения. Образцы представляли собой фрагменты штукатурки толщиной порядка 15 мм и площадью от 3 до 70 см², каждый из которых был покрыт красочным слоем. Всего было исследовано 25 фрагментов, имеющих цвета различных оттенков. Поверхность фрагментов сильно неоднородная, поэтому для каждого образца измерение проводилось как минимум в 10 точках. Таким образом, всего было получено более 300 спектров. После измерения спектры группировались по близким спектральным компонентам и соотносились со спектрами из базы данных RRUFF [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] и литературы.

В результате исследования был определён следующий набор веществ/пигментов, входящих в состав исследованных красочных слоёв: гематит, гётит, селадонит, графит, киноварь, уголь, лазурит, анатаз, кварц и кальцит. Кроме этого, было проведено сопоставление результатов исследований для двух церквей. Одним из интересных фактов стало различное количество использованного дорогостоящего в то время синего пигмента лазурита. Использование лазурита практически без примесей в церкви Благовещения на Городище XII века [2] подтверждает, что её роспись была важным событием, а заказчик был хорошо обеспечен. Из летописей известно, что этот храм был построен в честь рождения первенца Новгородского князя и являлся вторым каменным строением Новгорода после Софийского собора. Несмотря на большое количество исследованных в настоящей работе фрагментов, ни на одном из них не было обнаружено значительное количество лазурита. По всей видимости, в этом случае финансы заказчиков росписи были ограничены.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 21-78-10077.

Литература

1. В.В. Седов, Основные результаты раскопок церкви Благовещения на Городище в 2016-2017 гг.: археология и архитектура, Архитектурная археология 1, 10-34, 2019. doi: 10.25681/IARAS.2686-6900.1.10-34.
2. I.A. Balakhnina, T.I. Anisimova, A.A. Mankova, A.Yu. Chikishev, N.N. Brandt, Raman microspectroscopy of fresco fragments from the Annunciation Church at Gorodishche at Veliky Novgorod, Eur. Phys. J. Plus 136, 610, 2021. doi: 10.1140/epjp/s13360-021-01604-8.
3. G.-L. Liu, S.G. Kazarian, Recent advances and applications to cultural heritage using ATR-FTIR spectroscopy and ATR-FTIR spectroscopic imaging, Analyst 147, 1777, 2022. doi: 10.1039/d2an00005a.
4. H.G.M. Edwards, P. Vandenabeele, P. Colomban, Raman spectroscopy in cultural heritage preservation, Cultural Heritage Science, ISBN 978-3-031-14378-6. doi: 10.1007/978-3-031-14379-3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОУСАДОЧНЫХ ПОЛИОЛЕФИНОВЫХ ПЛЕНОК, СШИТЫХ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ СВЕТОМ

Кочешкова В.А., Ларина Н.А., Рябочкина П.А., Кострюков С.Г.

Национальный исследовательский Мордовский ГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

E-mail: lerakoheshkova@mail.ru

Пятислойные термоусадочные полиолефиновые пленки, сшитые ультрафиолетовым светом – это уникальный полимерный материал, используемый для упаковки различной продукции (пищевой, промышленной, канцтоваров и т.д.). Данная пленка отличается от термоусадочной полиолефиновой пленки без УФ «сшивки» более высокими механическими свойствами.

При воздействии УФ света на полиэтилен с течением времени происходит разрушение его молекулярной структуры. Данный процесс происходит за счет реакций фотоокисления и термоокисления [1, 2]. При этом могут обрываться и сшиваться цепи полимера, а также образовываться карбонильные (C=O) и винильные (CH=CH₂) группы [3]. Одним из эффективных методов исключения деструктивных процессов в полиэтиленовых пленках, является их «сшивание» с использованием фотоиницирующих добавок и УФ облучения. Благодаря процессу «сшивания» улучшаются физико-механические свойства данных пленок [4-7]. Механизм фотохимического «сшивания» заключается в том, что под действием УФ излучения молекулы фотоинициатора переходят в возбужденное состояние и, взаимодействуя с поверхностью полиэтилена, образуют макрорадикалы (отрывается атом водорода от молекулы полиэтилена). Последующая рекомбинация макрорадикалов приводит к образованию поперечных связей между молекулами [8]. Следовательно, физико-механические свойства полимерных пленок напрямую зависят от их оптических свойств, и их исследование является актуальной задачей.

Для изучения оптических свойств полимеров широко используются спектроскопические методы исследования. Анализ литературных данных показал, что оптические свойства полиолефиновых пленок с фотохимической «сшивкой» изучены недостаточно. В научной литературе представлены в основном работы по анализу колебательных спектров данных пленок в среднем ИК диапазоне спектра, полученных методом ИК-Фурье спектроскопии [6, 7]. Кроме того, отсутствуют работы по выявлению взаимосвязи между интенсивностью облучения УФ светом данных пленок и их оптическими характеристиками.

Представленные в настоящей работе исследования являются новыми и представляют как научный, так и практический интерес. Нами впервые были исследованы оптические характеристики пятислойных полиолефиновых термоусадочных пленок с ультрафиолетовой «сшивкой» и исходного сырья (гранул полиэтилена, полипропилена и фотоиницирующей добавки). Выявлено влияние композиционного состава и интенсивности облучения УФ светом на конформацию молекулярной цепи полимера в данных пленках. Также данные комплексные исследования позволили выявить влияние фотоиницирующего агента на оптические характеристики пленок. Полученные результаты будут способствовать улучшению процесса производства полимерной продукции.

Литература

1. Tidjani A. Comparison of formation of oxidation products during photo-oxidation of linear low density polyethylene under different natural and accelerated weathering conditions // *Polymer Degradation and Stability*. 2000. V. 68. P. 465-469.
2. Khabbaz F., Albertsson A.-C., Karlsson S. Chemical and morphological changes of environmentally degradable polyethylene films exposed to thermo-oxidation // *Polymer Degradation and Stability*. 1999. V. 63. P. 127-138.
3. Scott G. "Green" Polymers // *Polymer Degradation and Stability*. 2000. V. 68. P. 1-7.
4. Xu S., et al. Synthesis and characterization of layered double hydroxides intercalated by UV absorbers and their application in improving UV aging resistance of bitumen // *Applied Clay Science*. 2015. V. 114. P. 112-119.
5. Sangamesha M. A., et al. Synthesis and characterization of 4-Hydroxy benzophenone (Ph₂CO)/ Polyvinyl alcohol (PVA) composites for ultraviolet (UV)-Shielding applications // *Materials Today: Proceedings*. 2022. V. 62. P. 5250-5257.
6. Vul T. I., et al. Design of silane-based UV-absorbing thin coatings on polyethylene films // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. V. 648. P. 129164.
7. Fu Y.-W., Sun W.F., Wang X. UV-Initiated Crosslinking Reaction Mechanism and Electrical Breakdown Performance of Crosslinked Polyethylene // *Polymers*. 2020. V. 12(2). P. 420.
8. Mueller M., Bandl C., Kern W. Surface-Immobilized Photoinitiators for Light Induced Polymerization and Coupling Reactions // *Polymers*. 2022. V. 14(3). P. 608.

ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ТЕРМОРАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА, ОБЛУЧЕННОГО ПОТОКОМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ КСЕНОНА

Кошкина О.А.¹, Москвитин Л.В.²

¹ *ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семёнова, Москва, Россия*

² *РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия*

E-mail: olga_koshkina_94@mail.ru

Цель настоящего исследования состояла в изучении природы изменений в оптических спектрах образцов плёнок терморadiационно-модифицированного ТРМ-ПТФЭ толщиной 20 мкм, подвергнутых воздействию потоков ускоренных ионов ксенона.

В спектрах оптического поглощения исходного полимера и ионно-облученных образцов ТРМ-ПТФЭ доминирует полоса оптического поглощения с максимумом при 188 нм. Эта полоса является одной из компонент тонкой структуры спектра ридберговского состояния фтора [1], и в настоящем исследовании была обнаружена впервые (рис. 1, а). Воздействие ионов ксенона до флюенсов $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-2}$ приводит к уменьшению интенсивности полосы 188 нм, что может быть связано с процессами дефторирования ТРМ-ПТФЭ. Напротив, облучение ТРМ-ПТФЭ до флюенсов $10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-2}$ сопровождается ростом оптического поглощения на длине волны 188 нм, обусловленного конкурент-

ным процессом образования двойных связей (рис. 1, б). Значительное усиление интенсивности оптического поглощения, наблюдаемое в спектре оптического поглощения образца ТРМ-ПТФЭ, облученного ионами ксенона до 10^{11} см⁻², может быть связано с перекрытием латентных треков ионов ксенона [1].

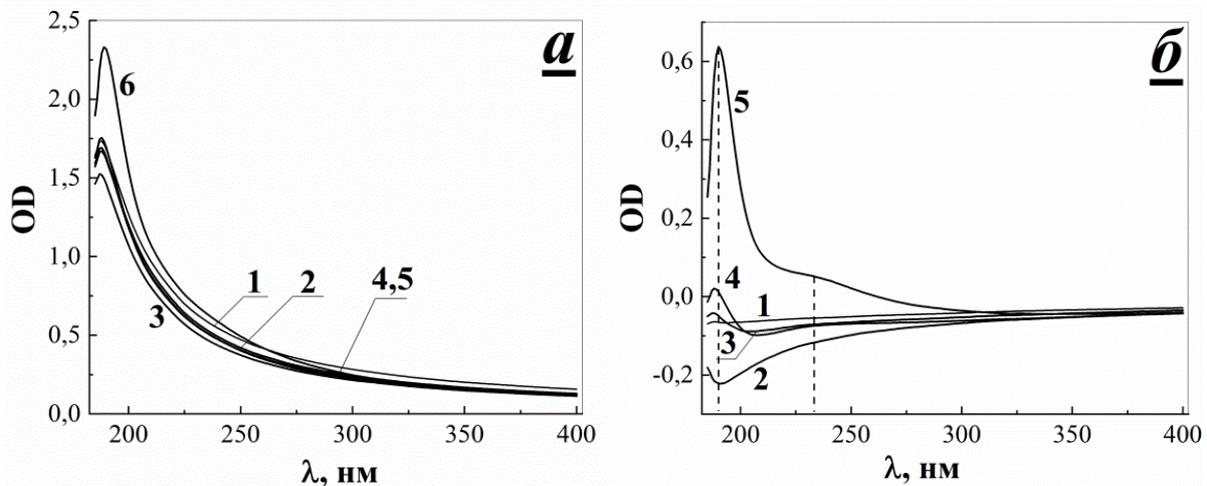


Рис. 1. Спектры оптического поглощения (1 – 6, а) и разностные оптические спектры (1 – 5, б) терморационно-модифицированного политетрафторэтилена. Разностные оптические спектры были получены вычитанием спектра оптического поглощения исходного образца (спектр 1 на рис. 1 а) из оптических спектров образцов полимера, облученных ионами ксенона с энергией 1 МэВ/нуклон до флюенсов 10^8 (2), 10^9 (3), 10^{10} (4), $3 \cdot 10^{10}$ и 10^{11} см⁻²

Разностный спектр оптического поглощения ТРМ-ПТФЭ, полученный вычитанием спектра необлученного полимера из спектра оптического поглощения образца, облученного потоком ионов ксенона до флюенса 10^{11} см⁻², может быть разделён на две области интереса: 185 – 340 нм; 340 – 1400 нм (рис. 2, а, б). Природа разностного спектра оптического поглощения в первом спектральном диапазоне может быть охарактеризована поглощением четырёх полос с максимумами при 188,6, 191,6, 195,5 и 204,5 нм. Как отмечено выше, природа полосы 188 нм обусловлена поглощением компоненты ридберговского состояния, в то время как происхождение полос 191,6, 195,5 и 204,5 может быть объяснено образованием на накоплением бутадиеновых групп в полимерных цепях. Полоса 233 нм может быть отнесена к гексатриеновым фрагментам полимерных цепей ионно-облученного ТРМ-ПТФЭ (рис. 1, а) [1].

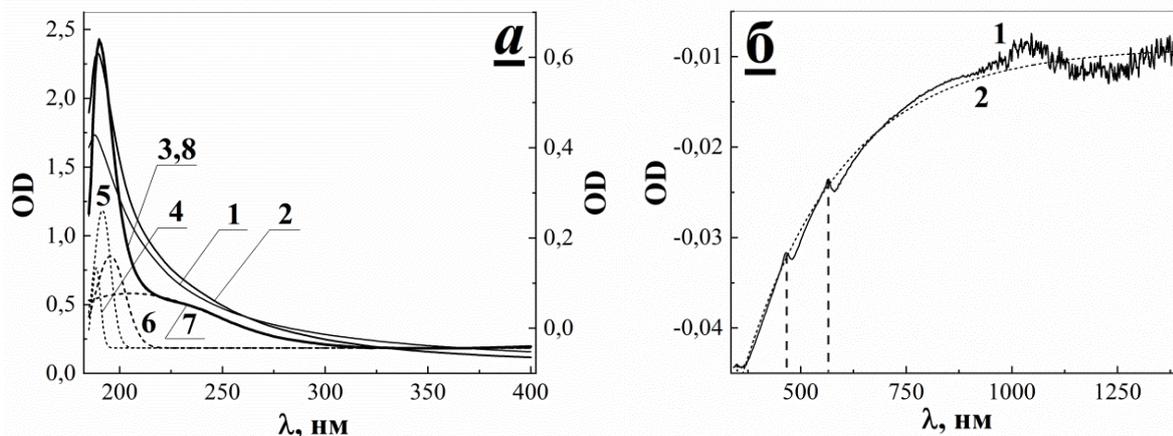


Рис. 2. а) Разностный спектр, полученный вычитанием спектра исходного образца терморационно-модифицированного политетрафторэтилена (1) из спектра оптического поглощения образца полимера, облученного ионами ксенона с энергией 1 МэВ/нуклон до 10^{11} см⁻² (2). На рисунке приведены результаты аппроксимации разностного спектра (3) набором гауссовых кривых (4 – 7); 8 – результат аппроксимации разностного спектра (3); б) Фрагмент разностного спектра, зарегистрированного в области спектра от 340 до 1400 нм (1) и результат его аппроксимации в рамках

модели рассеяния света Рэлея (2). Штриховыми линиями показаны полосы поглощения продуктов радиолиза терморрадиационно-модифицированного политетрафторэтилена

В области спектра 340 – 1400 нм доминирует широкополосное поглощение, природа которого может быть обусловлена рэлеевским рассеянием света на поверхности грани кристаллов ТРМ-ПТФЭ (рис. 2, б, кривая 2). Кроме того, в разностном спектре полимера наблюдаются полосы оптического поглощения с максимумами при 348,7, 464,3 и 563,3, происхождение которых может быть связано с образованием полиеновых структур с длиной сопряжения 12, 13 и 14 двойных углерод – углеродных связей, соответственно. Также необходимо отметить интерференционную картину, которая проявляется в области длин волн, превышающих 890 нм.

Исследование выполнено при поддержке целевой программы финансирования научных групп, сотрудничающих в рамках проекта «Комплекс НИСА» в 2023 году, с использованием оборудования Центра коллективного пользования НИЯУ «МИФИ» «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников». Авторы благодарят Рындя С.М. за помощь в измерении спектров оптического пропускания ионно-облученных образцов ТРМ-ПТФЭ.

Литература

1. Moskvitin L.V., Koshkina O.A., Slesarenko S.V., Arsentyev M.A., Trakhtenberg L.I., Ryndya S.M., Magomedbekov E.P., Smolyanskii A.S. Thermoradiation modified polytetrafluoroethylene as a basis for membrane fabrication: resistance to hydrogen penetration, the effect of ion treatment on the chemical structure and surface morphology, evaluation of the track radius // *Membranes*, 2023, 13, 101. <https://doi.org/10.3390/membranes13010101>

ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ ФРАКТАЛЬНЫХ СПЕКЛОВЫХ ПУЧКОВ СТРУКТУРОЙ ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Кубанов Р.Т., Зотов А.М., Павлов Н.Н.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: yttyfsgtgf@mail.ru

Свойства спекл-полей оптического излучения нашли отражение в многочисленных монографиях и статьях (см., например, [1, 2, 3]). Определенное внимание исследователей привлекли так называемые фрактальные спекловые структуры. Такую структуру приобретают волны, отраженные от шероховатых плоскостей, и прошедшие через гистологические срезы биологических тканей. Было установлено, что в первом случае по величине фрактальной размерности распределения интенсивности волны можно определять степень шероховатости отражающей поверхности [4], а во втором – оценивать предрасположенность ткани к появлению злокачественных образований [5]. Спекловые световые пучки нашли применение в офтальмологии. Путем освещения глазного дна светом, имеющим спекловую структуру, удается не только бороться с рядом патологий, но и повышать эмоциональный тонус пациента [6].

На практике, довольно часто фрактальные спекловые поля передаются на исследуемый объект или экран по средствам линзы, которая формирует в необходимой плоскости изображение спеклового поля. Однако, до сих пор не решен вопрос о том, как соотносятся фрактальные размерности объекта и фрактальные размерности изображения. В данной работе решение указанного вопроса проводилось на основе теоретического и экспериментального исследования.

В теоретической части работы анализ процессов распространения пучка со спекловой структурой в свободном пространстве, а также при прохождении через линзу осу-

ществлялся на основе численного моделирования с использованием специально разработанного программного обеспечения. Применялся метод разложения изначального спеклового поля по плоским волнам. Изначальная структура пучка строилась с использованием двумерной функции Вейерштрасса, на рис.1 показано смоделированная с помощью данной функции структура спеклового поля.

Моделирование показало что в плоскости изображения световые пучки обладали фрактальной размерностью заметно превышающую изначальную фрактальную размерность. Этот результат был проверен экспериментально.

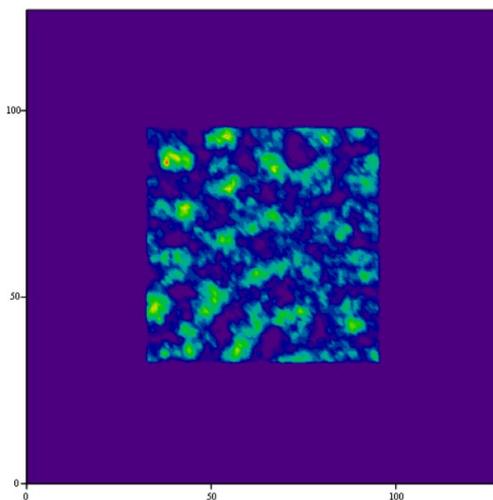


Рис.2 Поле, сгенерированное с помощью функции Вейерштрасса-Мандельброта.

Для постановки экспериментов был разработан пространственный модулятор света использующий жидкокристаллическую матрицу, аналогичную тем, что используются в компьютерных дисплеях. Программное обеспечение работы этого модулятора осуществлялось путем применения стандартных программ системы MathCAD. Это позволяло моделировать структуру выходного пучка с различными значениями фрактальной размерности, с разными статистическими характеристиками. Проведенные эксперименты подтвердили те факты, которые были зафиксированы в ходе теоретической части работы. Иллюстрацией этому могут служить рисунки, приведенные ниже. На них приведены фрагменты изначального распределения интен-

сивности по поперечным координатам (рис.1а) и распределение интенсивности в плоскости изображения линзы с фокусным расстоянием $F=20\text{см}$ (рис.1б). Фрактальные размерности распределения интенсивности определялись по поведению графика структурной функции построенного в двойных логарифмических координатах. Линейный характер графиков указывал на наличие фрактальных свойств излучения в фиксированных плоскостях. Было обнаружено что фрактальная размерность поля в плоскости изображения отличалась от размерности изначального поля.

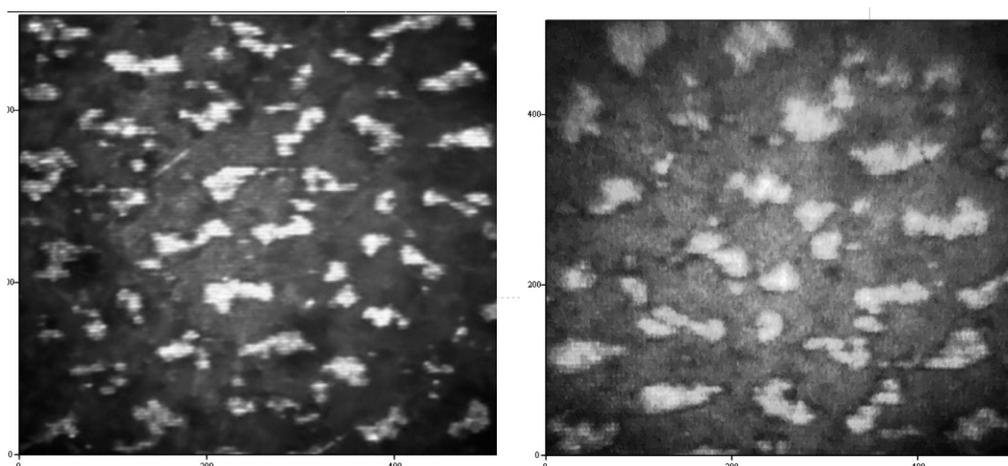


Рис.2. Спекловое поле в предметной плоскости(а) и плоскости изображения(б).

Авторы выражают благодарность профессору П.В. Короленко за помощь в работе.

Литература

1. Франсон М. Оптика *спеклов*. М.: Мир, 1980. – 171 с.

2. Goodman J. W., *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* (Roberts and Company, 2007).
3. Dainty J. C., *Laser Speckle and Related Phenomena*, Topics in Applied Physics (Springer, 2013).
4. Li Z., Li Hui, Qiu Y. Fractal analysis of laser speckle for measuring roughness // Proc. of SPIE Vol. 6027, 60271S, (2006) · 0277-786X/06/.
5. Ульянов А.С. Использование лазерных спеклов при идентификации патологически измененных биотканей // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – № 6. – С. 557-562.
6. Каданер Г.И., Овчинников Б.В., Рубинштейн М.М. Высокоэффективный офтальмологический спекл-стимулятор // Оптический журнал Т. 74, №12, с. 19-23, 2007 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А. Д. Кудряшов¹, О. Э. Сарманова¹

¹МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, Россия, Москва
E-mail: kudriashov.ad18@physics.msu.ru

Развитие металлургии, производство пестицидов и удобрений, фармакологии и т.д. сопровождается ежегодными выбросами в окружающую среду тысячи тонн соединений, которые являются глобальными источниками загрязнения среды тяжелыми металлами [1]. Ионы тяжелых металлов не подвергаются биодegradации и накапливаются в поверхностных и подземных водах, почве и, в конечном счете, в организме человека, вызывая различные заболевания и расстройства [2]. Таким образом, борьба с отравляющими веществами в жидких средах становится все более острой проблемой.

Методы оптической спектроскопии получили широкое распространение в диагностике жидких сред благодаря своей неинвазивности, экспрессности и способности одновременно определять концентрации многих химических элементов с привлечением современных методов анализа данных. Методы машинного обучения (ММО) представляют собой новый эффективный подход к анализу спектроскопических данных с помощью сочетания математики и статистики [3].

В данной работе для решения обратной задачи (ОЗ) оптической спектроскопии используется нейросетевой подход, предполагающий получение представительного набора данных – оптических спектров водных растворов, содержащих соли различных металлов. Получение такого набора – трудоемкий и времязатратный процесс. В работе мы предлагаем метод увеличения представительности набора за счет «синтетических» спектров, полученных с помощью генеративно-состязательных нейронных сетей (ГСНС) [4].

Генерация синтетических спектров поведилась на основе базы данных, состоящей из спектров оптического поглощения и ИК-поглощения 3745 растворов неорганических солей (Zn(NO₃)₂, ZnSO₄, Cu(NO₃)₂, CuSO₄, LiNO₃, Fe(NO₃)₃, NiSO₄, Ni(NO₃)₂, (NH₄)₂SO₄, NH₄(NO₃)) в дистиллированной воде и 400 растворам – в воде из Москвы-реки. Концентрация катионов варьировалась в диапазоне от 0 до 1 М. ОЗ решалась с помощью многослойных персептронов, обученных на совокупности реальных спектров и спектрах, сгенерированных с помощью генеративно-состязательной НС. В работе обсуждается влияние процедуры увеличения представительности набора данных на качество решения ОЗ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00333, <https://rscf.ru/project/19-11-00333/>.

Литература:

1. P.B. Tchounwou, C.G. Yedjou, A.K. Patlolla, D.J. Sutton, Heavy Metal Toxicity and the Environment, *Exp. Suppl.* 101 (2012) 133–164, https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
 2. R. Singh, N. Gautam, A. Mishra, R. Gupta, Heavy metals and living systems: An overview, *Indian J. Pharmacol.* 43 (2011) 246–253, <https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>.
 3. F. Akbal, S. Camcı, Treatment of metal plating wastewater by electrocoagulation, *Environ. Prog. Sustain.* 31 (2012) 340–350, <https://doi.org/10.1002/ep.10546>.
- Goodfellow, Ian, et al. "Generative adversarial networks." *Communications of the ACM* 63.11 (2020): 139-144.

УСТРОЙСТВО МОБИЛЬНОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ

Куркова А.Д.

С-Пб. ПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Email: kurkova.ad@edu.spbstu.ru

В последние годы промышленное производство в мире быстро набирает обороты. Состояние окружающей среды постоянно ухудшается. Сокращается количество зеленых насаждений и других естественных барьеров, которые осуществляют очистку окружающей среды. Эти негативные процессы приводят к увеличению в воздушной среде пылевых частиц. Наибольшая концентрация пыли формируется в основном в густонаселённых районах городов и представляет большую опасность для их жителей. Это связано с тем, что транспорт, промышленные выбросы и смог от тепловых станций являются основными источниками таких частиц пыли. Особенно опасны для людей твердые частицы размером 2,5 мкм (PM_{2,5}). Они преодолевают естественные защитные барьеры человека, проникая в организм сквозь слизистую поверхность органов дыхания, а затем распространяясь внутри, преодолевая защитные мембраны организма и проникая непосредственно в клетку. Проблема заключается в том, что точность портативных измерительных приборов параметров пыли на основе лазера невысока ($\pm 15\%$), поэтому создание оптических устройств с лучшими точностными характеристиками и эффективностью измерений твердых частиц является одной из приоритетных задач современной оптики.

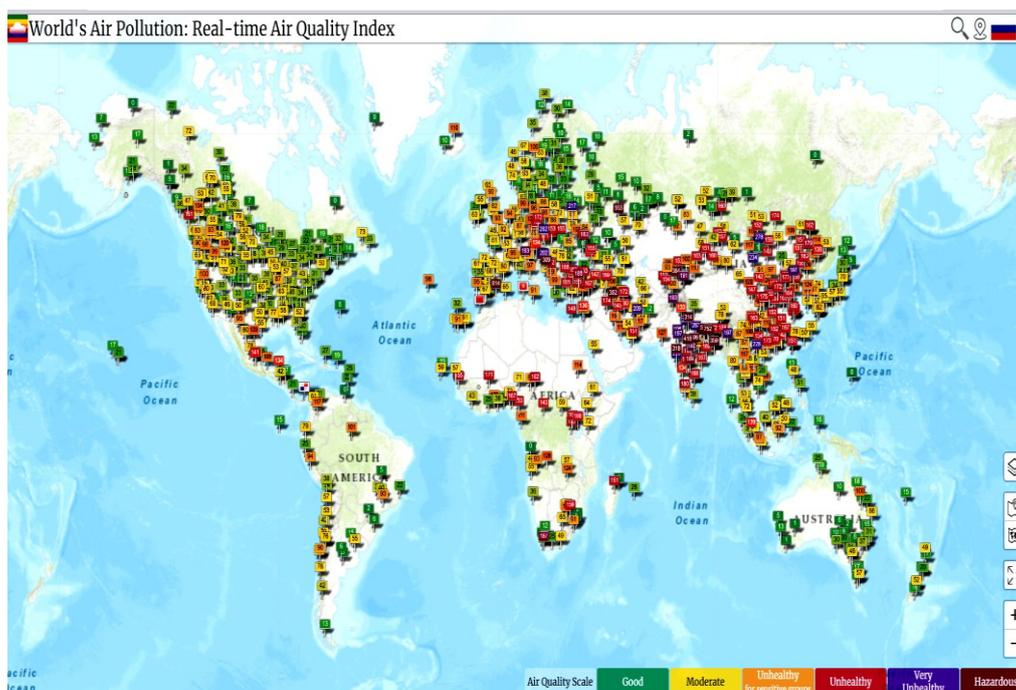


Рис. 1. Загрязнение воздуха частицами PM_{2.5} в мире на ноябрь 2022 г.

Предлагается создание мобильного лидара на основе твердотельного лазера, работающего на основе эффекта дифференциального поглощения оптического излучения в ИК-области спектра в импульсном режиме. Данный метод основан на явлении резонансного поглощения в пределах контура линии поглощения исследуемого газа. ИК-диапазон привлекателен тем, что здесь находятся спектральные структуры поглощения практически всех атмосферных газов и твердых частиц, таких как PM_{2.5}. Выбор полупроводникового лазера обосновывается несколькими фактами:

- компактность такого излучателя и простота конструкции;
- большой коэффициент полезного действия (КПД);
- широкий диапазон длин волн генерации (от 0,3 до 30 мкм);
- плавная перестройка длины волны излучения;
- достаточно маленькая потребляемая мощность.

Литература

1. Kurkova A.D., Davydov V.V., Veracity a method of detecting scattered laser radiation for content measuring of particulate matter in the air // Materials of 9th International School and Conference (Saint Petersburg OPEN 2022) on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. – 2022. – С. 173-174.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО НАГРЕВА НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Кучумов И.Д.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: ikuchum@gmail.com

Спектроскопия на основе комбинационного рассеяния света (КРС) нашла широкое применение в химии, физике и медицине. Её значительное преимущество по сравнению с другими аналитическими методами заключается в простоте подготовки и объёму по-

лучаемой информации. КРС спектроскопия позволяет изучать образцы в микроскопических количествах и в водных растворах.

По спектрам КРС можно определить не только точный состав образца, но и вклад каждого вещества в интенсивность рассеяния. А по отношению стоксовой и антистоксовой составляющих - температуру этих веществ без внешнего вмешательства [1].

Это свойство позволяет изучить нагрев водных суспензий наночастицы (НЧ) кремния (Si), обладающих уникальными оптическими [2] и химическими свойствами. Поэтому в данной работе производится исследование зависимости лазерного нагрева водных суспензий НЧ Si от их размера и концентраций на основе эффекта КРС. Полученные данные будут использованы для изучения эффекта локализованной НЧ фототермии [3].

Литература

1. Hart, T.R.; Aggarwal, R.L.; Lax, V. Temperature Dependence of Raman Scattering in Silicon. *Phys. Rev. B* 1, 638–642, (1970)
2. Kovalev D., Heckler H., Polisski G., Koch F. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 215, 871 (1999)
3. Lee C., Kim H., Hong C., Kim M., Hong S.-S., Lee D.H., In Lee W. *J. Mat. Chem.*, 18, 4790 (2008)

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ СЕГМЕНТИРОВАННЫХ СПИРАЛЬНЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ МАРКИ КВ

Лихов В.В.

*ИОФ им А.М. Прохорова РАН, НЦ волоконной оптики им. Е.М. Дианова,
Москва, Россия; E-mail: vladislav-likhov@fo.gpi.ru*

Мультиплексирование по орбитальному угловому моменту (ОУМ) является одним из перспективных способов увеличения пропускной способности волоконно-оптических линий связи. Спиральные брэгговские решётки (СБР), записанные в объёме прозрачных диэлектриков методом прямой лазерной записи, позволяют получать пучки с ОУМ без необходимости вывода пучка в свободное пространство [1]. Однако, проблемой данной техники является неравномерность изменения показателя преломления спирали по угловой координате (Рис. 1, а) [2].

Для достижения регулярной модуляции изменения показателя преломления по углу мы предлагаем запись сегментированных спиралей (Рис. 1, б). При этом условие сохранения углового момента сохраняется, но в модифицированном виде [3].

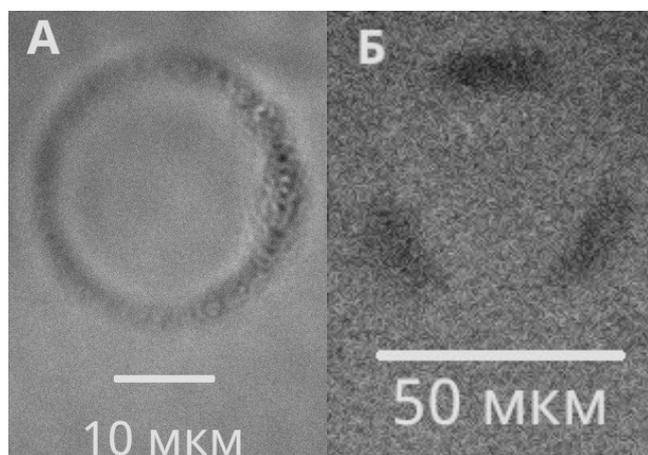


Рис. 1. А СБР в кварцевом стекле марки КВ, вид с торца, подсветка снизу; Б Сегментированная СБР в кварцевом стекле марки КВ, вид с торца, подсветка снизу.

Для прямой лазерной записи использовалась фемтосекундная лазерная система с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 180 фс. Пучок фокусировался в объёме стекла двадцатикратным объективом с $NA = 0.45$ с кольцом коррекции сферической аберрации. В ходе исследования было записано 30 спиралей одинаковой геометрии с фиксированным шагом спирали 5 мкм, пятью значениями перекрытия импульсов (от 6 до 64 импульсов на точку) и шестью значениями энергии импульса (от 1.2 до 2.5 мкДж), а также две серии по семь спиралей с шагом от 5 до 0.7 мкм: первая серия с энергией импульса 2.5 мкДж и перекрытием импульсов 64 импульсов на точку; вторая серия с энергией импульса 2.8 мкДж и перекрытием 16 импульсов на точку.

Измерена зависимость изменения показателя преломления в витках спирали от энергии и перекрытия импульсов, а также от шага спирали. Измерения контраста показателя преломления были проведены с помощью количественной фазовой микроскопии (QPM) на длине волны 503 нм.

Установлено, что изменение показателя преломления в витках спирали возрастает с увеличением перекрытия импульсов и достигает насыщения между значениями перекрытия 16 и 32 импульса на точку. Увеличение энергии импульса при равном перекрытии импульсов также увеличивает амплитуду модуляции показателя преломления. При записи спиралей с различным шагом уменьшение шага приводит к слиянию витков спирали и постепенному исчезновению модуляции показателя преломления.

В результате исследования были найдены оптимальные условия для записи регулярных сегментированных спиралей, а также оценено пространственное разрешение использованного нами метода записи. Показано, что прямая лазерная запись позволяет достичь шага спирали до 3 микрон без потери амплитуды модуляции показателя преломления.

Автор выражает благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Охримчуку А.Г. за плодотворные консультации при планировании исследования и подготовке публикации.

Литература

1. Okhrimchuk A. G. et al. Helical Bragg gratings: experimental verification of light orbital angular momentum conversion //Journal of Lightwave Technology. – 2022. – Т. 40. – №. 8. – С. 2481-2488.
2. Likhov V. V., Vasiliev S. A., Okhrimchuk A. G. Direct Laser Writing of Bragg Gratings in Silica Glass by Helical Motion of a Lenticular Beam Waist //2022 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2022. – С. 1-1.
3. Лихов В. В. и др. Прямая лазерная запись спиральной брэгговской решетки в кварцевом вихревом волоконном световоде //Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №. 11. – С. 1001-1006.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ НАСЫЩЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В ДВУХМИКРОННОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ

Лобанов А.И.^{1,2}, Филатова С.А.¹, Садовникова Я.Э.², Камынин В.А.¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

E-mail: l0banov.a.i@yandex.ru

Насыщающиеся поглотители оптического излучения позволяют реализовать режимы синхронизации мод или модуляции добротности в различных лазерах [1,2]. В связи

с этим их изучение вызывает большой интерес. К основным свойствам насыщающихся поглотителей можно отнести: глубину модуляции, порог разрушения и времена релаксации. Так как данные характеристики играют решающую роль при создании лазерных систем, востребованы методы контроля. С этой целью был разработан автоматический универсальный комплекс для измерения динамики насыщения поглощения, способный учитывать свойства конкретного материала насыщающегося поглотителя.

Принципиальная схема комплекса представлена на схеме (Рис. 1). В качестве источника тестового лазерного излучения использован гольмиевый волоконный лазер, работающий в режиме синхронизации мод (центральная длина волны излучения 2080 нм, длительность импульсов до 2 пс, частота следования 19 МГц). Часть сигнала от источника отводится на запускающий фотодетектор ①. Другая часть излучения попадает на первый электронно-управляемый аттенюатор, с помощью которого происходит контролируемое ослабление мощности излучения, а следовательно уменьшение амплитуды импульсов. Ослабленный сигнал подается на акустооптический модулятор (АОМ). АОМ формирует цуг импульсов с нарастающей амплитудой, форма и частота следования которого определяется формой электрического сигнала, поступающего с генератора электрических импульсов произвольной формы. Далее излучение делится оптическим делителем (50/50) на два канала: тестовый и опорный. Тестовый канал содержит исследуемый образец, а опорный содержит оптическую линию задержки. Далее сигналы с каналов сводятся в делитель и уже суммарный сигнал попадает на управляемый аттенюатор, который предназначен для сохранения линейного режима работы принимающего фотодетектора ②. Сигнал с этого детектора анализируется компьютером посредством осциллографа. Также с помощью компьютера осуществляется контроль аттенюаторов и становится доступна корректировка профиля цуга импульсов за счет его связи с генератором произвольных электрических импульсов.

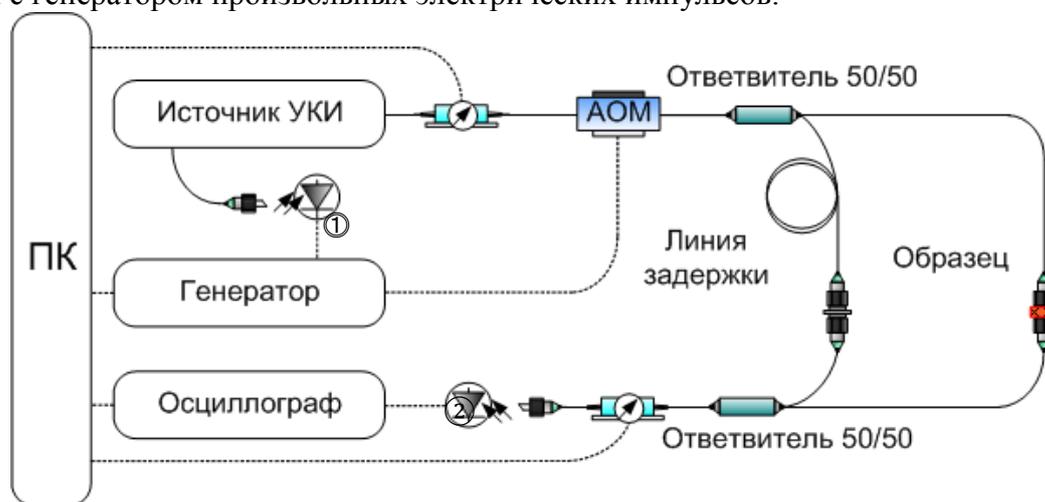


Рис. 1. Схема автоматического комплекса. (Волоконно-оптическое соединение обозначено сплошной линией, электрическое — пунктирной)

В результате, в памяти компьютера формируется два массива данных амплитуд импульсов с двух оптических каналов: тестового и опорного. Ввиду нелинейности пропускания насыщающегося поглотителя линейно промодулированный сигнал будет искажаться при прохождении через образец. Зная отношение значений уровней сигнала тестового к опорному, а также обладая информацией о точном значении коэффициентов деления и аттенюации в памяти компьютера, реализуется восстановление кривых пропускания. Оперирова скважностью и частотой пакетов импульсов, можно регулировать тепловую нагрузку на исследуемые образцы.

Работа выполнена на базе Научного центра мирового уровня «Фотоника» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ 075-15-2020-912).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00126.

Литература

1. Jiang T. et al. Ultrafast fiber lasers mode-locked by two-dimensional materials: review and prospect // *Photonics Res.* 2020. Vol. 8, № 1. P. 78.
2. Ma C. et al. Recent progress in ultrafast lasers based on 2D materials as a saturable absorber // *Appl. Phys. Rev.* 2019. Vol. 6, № 4.

ИТТЕРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, РАБОТАЮЩИЙ В РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ УСИЛЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1127 НМ

Макеева А.Р.^{1,2,*}, Филатова С.А.², Камынин В.А.², Рыбалтовский А.А.³

¹ РУДН, Институт физических исследований и технологий, Москва, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

³ ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, НЦ им. Е.М. Дианова РАН, Москва, Россия

Лазеры, на основе волокон, легированных ионами иттербия (Yb^{3+}), являются наиболее распространенными, генерирующими излучение в спектральном диапазоне 980–1160 нм [2]. Данные лазеры находят широкое применение в различных областях науки и техники благодаря своей компактности, высокой мощности и стабильности. На сегодняшний день иттербиевые волоконные лазеры активно используются для резки, маркировки, сварки и обработки материалов [5]. Реализованы разные конфигурации импульсных Yb волоконных лазеров с различными характеристиками выходного излучения. Однако наиболее простым решением для получения наносекундных или микросекундных импульсов является использование метода переключения усиления (gain-switch) в волоконных лазерах [3,4].

В данной работе предложен и исследован полностью волоконный Yb лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм, с возможностью управления переключением усиления.

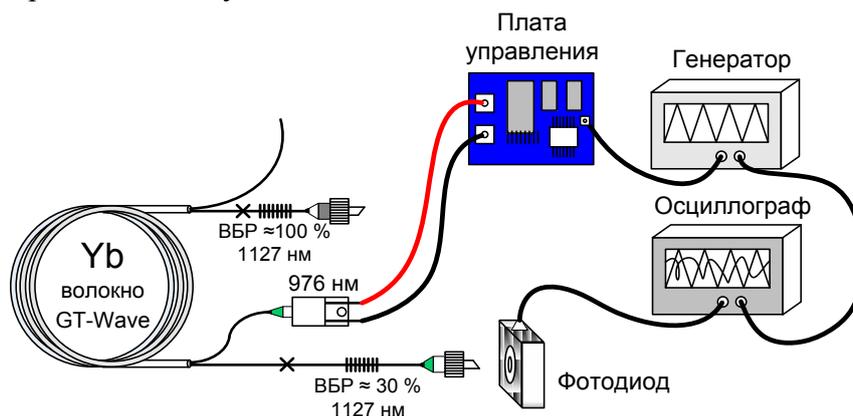


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию характеристик Yb волоконного лазера, работающего в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм. ВБР – волоконная брэгговская решетка.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки Yb волоконного лазера, работающего в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм. Накачка иттербиевого лазера осуществлялась одним полупроводниковым лазерным диодом с волоконным выходом, длиной волны излучения 976 нм и выходной мощностью до 27 Вт. В качестве активной среды использовалось оптическое волокно с многоэлементной первой оболочкой, легированное ионами иттербия (GTWave) [1]. Резонатор Yb лазера был сформирован двумя волоконными брэгговскими решётками (ВБР), выполняющими

функцию глухого и выходного зеркал. «Глухая» (коэффициент отражения $\approx 100\%$) и «выходная» (коэффициент отражения $\approx 30\%$) ВБР были изготовлены на отрезках фоточувствительного германосиликатного волокна с помощью фазовой маски с периодом 775 нм и УФ-излучения эксимерного лазера с длиной волны 193 нм. Максимумы отражения обеих ВБР совпадали по длине волны (1127 нм). Длина активного волокна в резонаторе составила около 5 метров. Для ввода излучения накачки в резонатор, а также для выведения из него непоглощённой части этого излучения, использовался пассивный элемент конструкции GTWave-волокна, представляющий из себя волновод из нелегированного кварцевого стекла с диаметром поперечного сечения 125 мкм. Для реализации режима переключения усиления лазерный диод накачки был подключен к плате управления в связке с генератором, с помощью которого происходило управление параметрами модуляции тока лазерного диода (частота, форма импульса, амплитуда, длительность).

На рис. 2(а) представлен спектр излучения Yb лазера. Длина волны генерации λ_c составила 1127 нм, что соответствует максимумам отражения ВБР, а ширина спектра $\Delta\lambda$, измеренная на полувысоте, не превышала 0,2 нм. На рис. 2(б) представлены полученные на выходе Yb лазера осциллограммы отдельного импульса и последовательности импульсов, следующих с заданной частотой 1 кГц. В данном случае ширина импульса на полувысоте составила $\tau \approx 0,37$ мкс, энергия импульса 6,2 мкДж, а пиковая мощность 12 Вт.

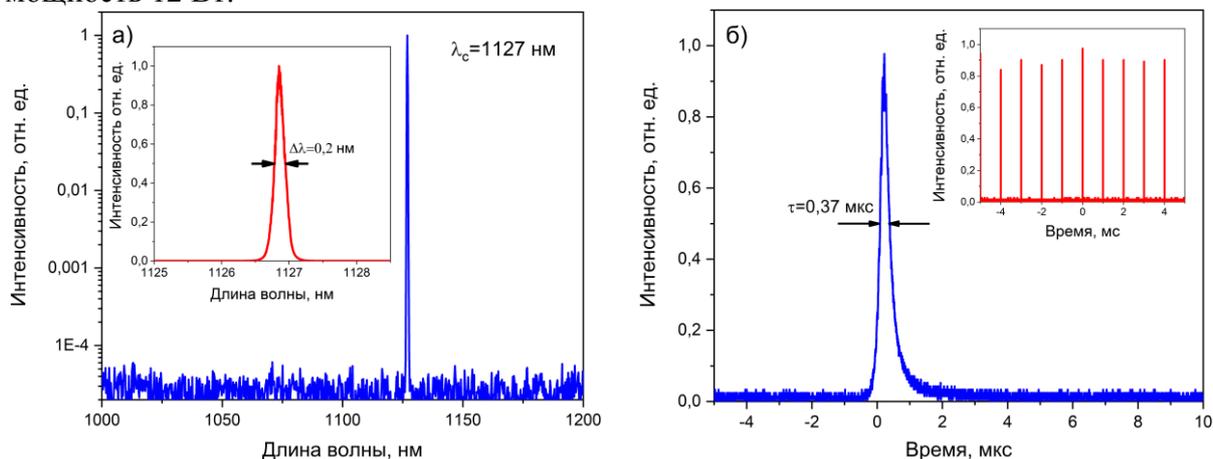


Рис. 2. а) Спектр излучения Yb лазера в разных масштабах; б) осциллограммы отдельного импульса и последовательности импульсов, следующих с частотой 1 кГц (на вставке).

В работе был впервые исследован Yb волоконный лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм. Режим переключения усиления был реализован за счет модуляции полупроводникового диода накачки. Были исследованы параметры излучения Yb лазера в зависимости от параметров модуляции диода накачки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00126, <https://rscf.ru/project/22-72-00126>

Литература

1. Буфетов, И.А., Бубнов, М.М., Мелькумов, М.А., Дудин, В.В., Шубин, А.В., Семенов, С.Л., Кравцов, К.С., Гурьянов, А.Н., Яшков, М.В., Дианов, Е.М. Волоконные Yb-, Er-Yb-и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой // Квантовая электроника. 2005, № 35(4), с. 328-334.
2. Addanki, S., Amiri, I.S., Yuparin, P. Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers // Results in Physics. 2018, № 10, p. 743-750.
3. Petkovšek, R., Agrež, V. Single stage Yb-doped fiber laser based on gain switching with short pulse duration // Optics Express. 2014, № 22(2), p. 1366.

4. Yang, J., Tang, Y., Xu, J. Development and applications of gain-switched fiber lasers // Photonics Research. 2013, № 1(1), p. 52-57.
5. Zhu, C., Wan, H., Min, J., Mei, Y., Lin, J., Carlson, B. E., Maddela, S. Application of pulsed Yb: Fiber laser to surface treatment of Al alloys for improved adhesive bonded performance // Optics and Lasers in Engineering. 2019, № 119, p. 65-76.

ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В ПОВЕРХНОСТИ ПЛОДОВ АЙВЫ ПО СПЕКТРАМ ОТРАЖЕНИЯ

Манафов Рустам

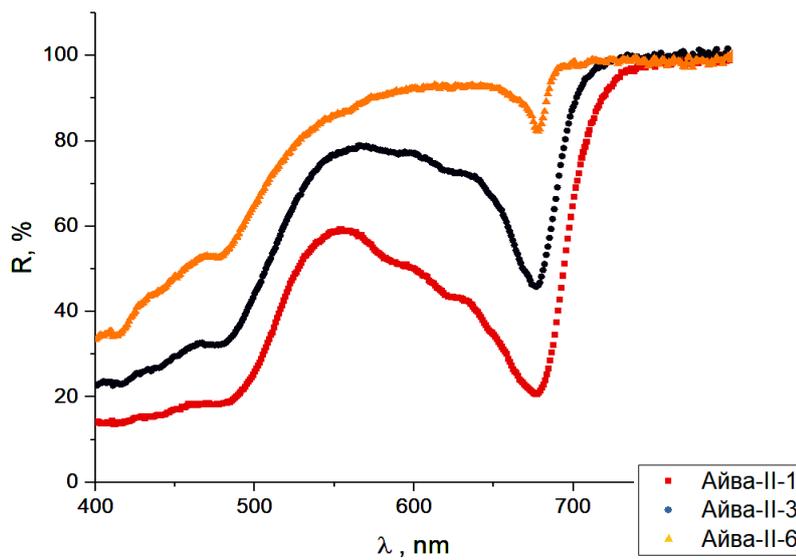
МГУ им. М.В. Ломоносова, Филиал МГУ в г. Баку, Азербайджан

E-mail: manafov2001@bk.ru

Применение методов оптической спектроскопии для изучения физиологического состояния растений обладает такими преимуществами как быстрота и возможность применения неразрушающего/дистанционного контроля. Оптические методы применяются также для детектирования спелости плодов и выбраковки недостаточно зрелых или пораженных болезнями образцов. Среди используемых методов – спектроскопия отражения или флуоресцентная спектроскопия, как стационарная, так и с модуляцией импульсного сигнала (Pulse-Amplitude-Modulation, ПАМ-флуориметрия). Спектры отражения (зависимость коэффициента отражения R от длины волны λ), измеренные в видимом и ближнем ИК диапазоне, позволяют определить концентрацию растительных пигментов (хлорофилла, каротиноидов или антоцианинов) в поверхностных тканях растений [1]. Концентрация пигмента измеряется по эмпирической формуле, которая связывает обратную величину коэффициента отражения на длине волны поглощения и концентрацию пигмента в контрольных образцах, измеренную аналитически (например, по спектрам поглощения экстрактов пигментов). Такие измерения ранее были проведены для листьев растений [2], плодов яблок [3], плодов цитрусовых [4]. Однако для плодов айвы исследование пигментов оптическими методами не проводилось.

Айва обыкновенная (лат. *Cydonia oblonga*) является одной из древнейших плодовых культур, известных человечеству. Родиной айвы считают Кавказ. Благодаря низкой калорийности, клетчатке, небольшому количеству сахара и фруктозе, плоды айвы считаются диетическими. В садовой культуре Азербайджана айва занимает особое место, ее выращивают практически во всех регионах республики и большую часть урожая экспортируют в Россию.

Целью данной работы является исследование возможности применения спектроскопии отражения для определения концентрации хлорофилла в поверхностном слое плодов айвы. Измерения проводили для высечек плодов айвы разной степени зрелости. Для регистрации спектров отражения использовался спектрофотометр Jasco V-770 UV-



Vis/NIR, работающий в диапазоне длин волн от 190 до 2700 нм. Детектор на основе ФЭУ используется для УФ-видимой области, а PbS детектор с охлаждением Пельтье — для ближней ИК-области. Высечку айвы размером примерно 2 см x 2 см помещали в специальный держатель. Спектры регистрировали в диапазоне длин волн 400...850 нм с шагом 1 нм со спектральным разрешением 2 нм. Обработка спектров заключалась в нормировке на коэффициент отражения в ИК области (в диапазоне 800-850 нм). Для измерения концентрации хлорофилла из тех же высечек плодов айвы готовили этанольные экстракты и выдерживали в темноте в течение 2 суток. Затем регистрировали спектры поглощения экстрактов в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см в спектральном диапазоне 350...800 нм. По значениям оптической плотности в длинноволновой полосе поглощения хлорофилла рассчитывали концентрацию хлорофилла a на единицу площади для каждого образца. На рис. 1 приведены спектры отражения для образцов плодов айвы, отличающихся пигментацией кожуры за счет разной концентрации хлорофилла. Чем больше хлорофилла в образце (на рис. 1 это образец П-6), тем меньше коэффициент отражения на длине волны поглощения хлорофилла около 670 нм.

Рис. 1. Спектры отражения для образцов плодов айвы с различным содержанием хлорофилла.

В качестве характеристики спектров отражения было выбрано отношение R_{800}/R_{676} – отношение коэффициентов отражения для длин волн 800 и 676 нм - в ближнем ИК диапазоне и области длинноволновой полосы поглощения хлорофилла. Как показали экспериментальные результаты, данная величина хорошо коррелирует с концентрацией хлорофилла a , измеренной по спектрам поглощения этанольных экстрактов. Найденный коэффициент пропорциональности двух величин будет использован в дальнейшей работе для определения концентрации хлорофилла в образцах айвы по измеренным спектрам отражения. Таким образом, в работе впервые была продемонстрирована возможность измерения концентрации хлорофилла в поверхностном слое плодов айвы с помощью спектров отражения. Отметим, что никакой предварительной пробоподготовки не проводилось. Данный метод применялся на высечках айвы, но потенциально может использоваться и на целых плодах, если это позволяет спектральная аппаратура. Цель разработки методов неразрушающего контроля - повышение эффективности диагностики сельскохозяйственных растений и плодов в процессе селекции, выращивания и хранения.

Автор благодарит к.ф.-м.н., доцента физического факультета МГУ Пацаеву С.В. за научное руководство данной работой, а также сотрудника филиала МГУ в Баку, к.ф.-м.н. Оруджева Т. за помощь в измерениях

Литература

1. Bulda O., Rassadina V., Smolikova G., Laman N. Spectrophotometric measurement of carotenes, xanthophylls, and chlorophylls in extracts from plant seeds // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008. Vol. 55. pp.544-551.
2. Parry C., Blonquist Jr, J., Bugbee B. In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: Analysis of the optical/absolute relationship // *Plant, Cell & Environment*. 2014. Vol. 37. 10.1111/pce.12324.
3. Zude-Sasse M, Truppel I, Herold B. An approach to non-destructive apple fruit chlorophyll determination // *Postharvest Biology and Technology*. 2002, Vol. 25, Issue 2, pp. 123-133.
4. Sighicelli M., Colao F., Laia A., Patsaeva S. Monitoring Post-Harvest Orange Fruit Disease by Fluorescence and Reflectance Hyperspectral Imaging // *Acta horticulturae*. 2009, Vol. 817, pp. 277-284.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ЭРИТРОЗИНА В ПЛЕНКАХ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

Мушин Ф.Ю.

Оренбургский ГУ, физический факультет, Оренбург, Россия/E-mail:
fedor.mushin@yandex.ru

Плазмонные наночастицы (НЧ) влияют на оптические свойства расположенных в непосредственной близости от них молекул органических красителей. Подавляющее большинство экспериментальных и теоретических работ посвящено влиянию плазмонных НЧ на флуоресценцию молекул люминофора, обусловленную разрешенными электрическими дипольными переходами. Работ, в которых изучается фосфоресценция органических молекул в присутствии плазмонных НЧ, существенно меньше. В работах [1-3] сообщается о сокращении времени жизни триплетных состояний молекул и усилении фосфоресценции в присутствии серебряных и золотых НЧ.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование спектрально-временных характеристик люминесценции молекул эритрозина в кислородонепроницаемых пленках поливинилового спирта (ПВС), в которые внедрены золотые или серебряные НЧ. Синтез НЧ осуществлялся по методу цитратного восстановления Туркевича-Френса [4]. Образцы пленок изготавливались методом полива 2 мл водного раствора, содержащего полимер, краситель и наночастицы Ag или Au в пропорциях, приведенных в таблице 1, на стеклянную подложку с последующим высушиванием.

Таблица 1 - Объемное содержание компонентов в базовом растворе различных образцов

№ образца \ Компоненты	1	2	3	4	5
А) ПВС, $c = 4\%$ (по массе)	0.6 мл				
Б) Эритрозин, $C = 10^{-5}$ М	0.2 мл				
В) НЧ Ag, $C = 6 \cdot 10^{-9}$ М	-	0.4 мл	0.8 мл	-	-
Г) НЧ Au, $C = 6 \cdot 10^{-9}$ М	-	-	-	0.4 мл	0.8 мл
Деионизированная вода	1.2 мл	0.8 мл	0.4 мл	0.8 мл	0.4 мл

Регистрация спектров люминесценции образцов производилась на спектрофлуориметрической установке (рис. 1А). В этой установке источником возбуждения молекул красителя служил твердотельный лазер с диодной накачкой, работающий на длине волны 532 нм. С целью расширения пучка и исключения процессов фотодеструкции красителя на пути лазерного пучка устанавливалась рассеивающая линза. Люминесцентный сигнал собирался с боковой грани пленки и регистрировался спектрометром ВМ-6002.

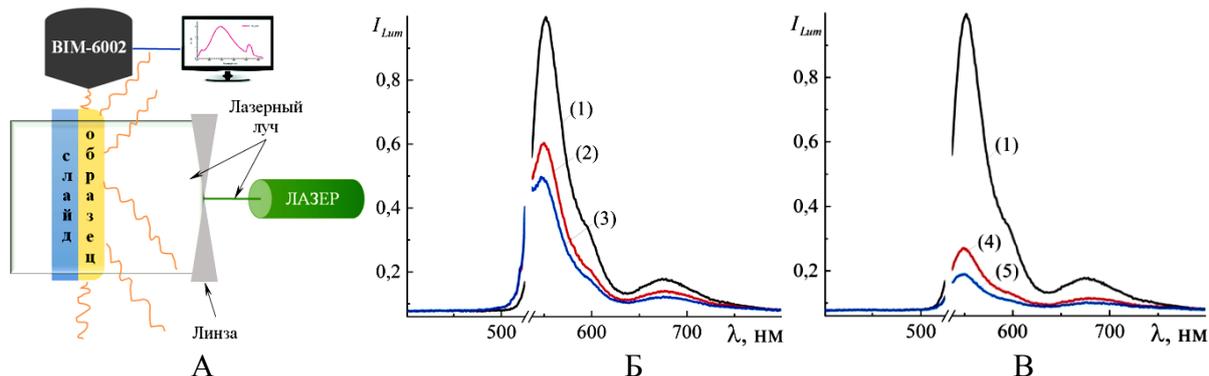


Рис. 1. Измерение спектров люминесценции: схема спектрофлуориметрической установки (А); спектры люминесценции эритрозина в образцах 1, 2, 3 (Б); 1, 4, 5 (В) (таблица 1)

Спектры люминесценции эритрозина изображены на рис. 1Б и 1В. Наличие в образцах 2 и 3 серебряных НЧ и в образцах 4 и 5 золотых НЧ приводит к уменьшению амплитуды сигналов флуоресценции и фосфоресценции эритрозина, причем, это уменьшение растет с концентрацией НЧ. Как видно из рисунков, тушение люминесценции красителя золотыми НЧ более эффективно, чем серебряными. Поскольку максимум спектра поглощения НЧ серебра лежит в области 430 нм, а НЧ золота в области 520 нм, перекрытие спектра люминесценции молекулы со спектром плазмонного резонанса золотой НЧ больше, что и приводит к более эффективному тушению.

Регистрация кинетики фосфоресценции красителя осуществлялась на спектрохронографической установке (рис. 2А), в которой использовалось излучение твердотельного Nd:YAG лазера LQ529 с частотой импульсов 1 Гц. Сигнал люминесценции снимался с помощью оптического волокна с боковой грани пленки и поступал в монохроматор МДР-206, настроенный на максимум длины волны (670 нм) в полосе фосфоресценции эритрозина, затем сигнал поступал на ФЭУ-79, регистрировался и отображался на экране осциллографа GDS-840С.

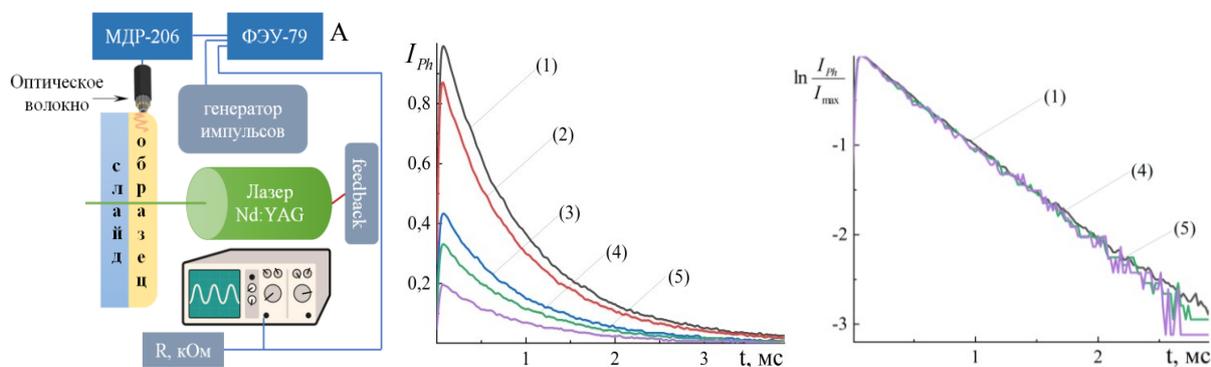


Рис. 2. Измерение кинетики фосфоресценции: схема спектрохронографической установки (А); кинетика фосфоресценции эритрозина в образцах 1 - 5 (Б); нормированный сигнал фосфоресценции эритрозина в образцах 1, 4, 5 (В) (таблица 1)

Кинетика фосфоресценции эритрозина в образцах 1 - 5 представлена на рис. 2Б, из которого видно, что зависимость амплитуды сигнала от материала и концентрации НЧ такая же, как и на рис. 1Б и 1В. Незначительное сокращение времени жизни триплетного состояния молекулы в присутствии золотых НЧ демонстрирует рис. 2В, на котором изображены нормированные сигналы фосфоресценции эритрозина в образцах 1, 4 и 5. Из графиков, представленных на этом рисунке, следует, что время жизни триплетного состояния эритрозина уменьшается с 980 мкс в образце 1 до 870 мкс в образце 5.

Таким образом, результаты проведенного исследования показали, что в окрашенных эритрозином пленках ПВС, допированных НЧ золота или серебра, наблюдается тушение люминесценции красителя и уменьшение времени жизни триплетного состояния молекул. Наблюдаемые эффекты можно объяснить появлением дополнительного канала дезактивации возбужденных состояний молекул - одностороннего безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения от молекулы к НЧ.

Литература

- [1] Temirbayeva D., Ibrayev N., Kucherenko M. // Journal of Luminescence. – 2022. – V. 243. – P. 118642.
- [2] Pacioni N.L., González-Béjar M., Alarcón E., McGilvray K.L., Scaiano J. C. // J. Am. Chem. Soc. – 2010. – V. 12. – No. 132(18). – P. 6298.
- [3] Wang C., Zhang X., Liu K., Dai X., Yang C., Guo S., Su H. // J. Phys. Chem. C. – 2019. – V. 123. – P. 27717–27724.

[4] Li X., Chen Y., Huang X. // J. Inorg. Biochem. – 2007. – V. 101. – P. 918 – 924.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДСТРОЙКИ ПОЛОЖЕНИЯ ОСИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОЗДУШНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Назарова К.С.

С-Пб. ПУ Петра Великого, ИЭиТ, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: knazarova0@ya.ru

В настоящее время разработано много конструкций подстройки положения оси лазерного излучения на основе измерения максимальной мощности, регистрируемой с использованием фотоприемного модуля [1, 2]. В этих конструкциях принцип подстройки основан на перемещении лазера или фотоприемника, или зеркал, или линзы. Это в ряде случаев создает сложности при автоматической подстройке системы, особенно при сильном морозе. Поэтому нами разработана принципиально новая конструкция, в которой этот недостаток устранен. На рис. 1 представлена разработанная нами конструкция воздушного оптического канала связи с новым модулем автоподстройки.

На рис. 2 представлена разработанная нами конструкция одна из частей автоматической системы подстройки положения оси лазерного излучения 3 для предложенного воздушного оптического канала связи.

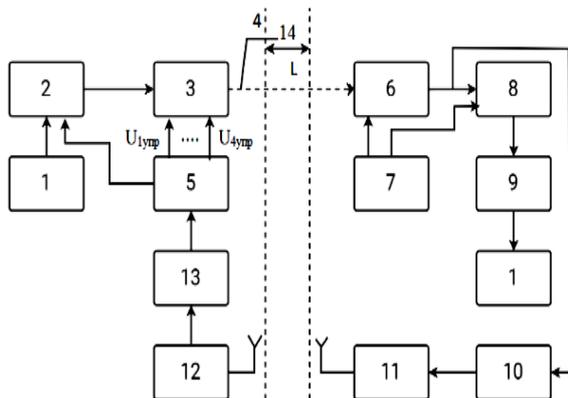


Рис. 1. Структурная схема воздушного оптического канала связи: 1 – сервер, 2 – лазерный передающий модуль с электрооптическим модулятором, 3 – автоматическая система подстройки положения оси лазерного излучения, 4 – лазерное излучения, 5 – многофункциональный блок питания, 6 – фотоприемный модуль, 7 – блок питания фотоприемника, 8 – АЦП, 9 – устройство обработки информации, 10 – измеритель тока, 11 – устройство обработки и передачи данных, 12 – радиоприемное устройство, 13 – устройство обработки информации и управления, 14 – воздушное пространство

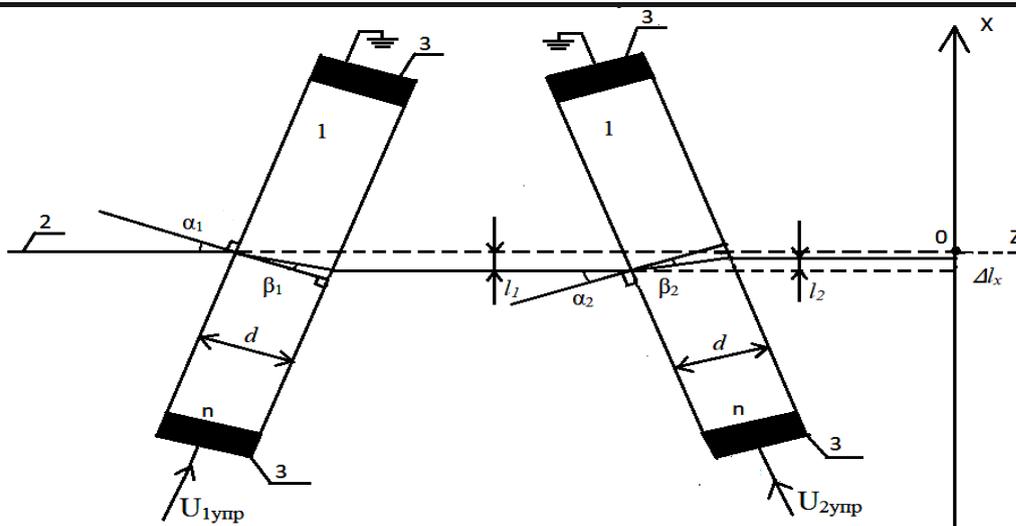


Рис. 2. Структурная схема части автоматической системы подстройки положения оси лазерного излучения по координате X в плоскости перпендикулярной oZ: 1 – кварцевая пластина, 2 – лазерное излучение, 3 – медная пластина

Для изменения положения оси лазерного излучения в плоскости oY часть конструкции оптической системы будет аналогичная, только пластины будут ориентированы к плоскости падения лазерного излучения по оси oZ под другим углом.

На основании представленной конструкции оптической системы (рис. 2) был выполнен расчет для определения смещения оси излучения в плоскости oX .

$$\Delta l_x = l_1 - l_2 \quad (1)$$

$$\Delta l_x = d \left(\left(\sin(a_1) - \frac{\frac{\sin(a_1) + n}{n_0} + \cos(a_1)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(a_1) + n}{n_0}\right)^2}} \right) \pm \left(\sin(a_2) - \frac{\frac{\sin(a_2) + n}{n_0} + \cos(a_2)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin(a_2) + n}{n_0}\right)^2}} \right) \right) \quad (2)$$

В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены результаты исследования работы разработанной оптической системы.

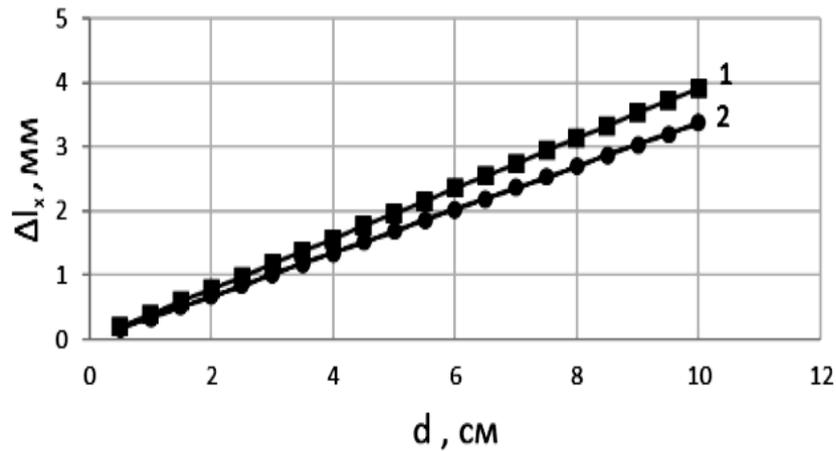


Рис. 3. Сравнение зависимостей Δl от d (1 – $n_{0лин}$, 2 – $n_{0кв}$)

Установлены преимущества по увеличению диапазона смещения положения оси лазерного излучения от выбора типа кварцевого стекла.

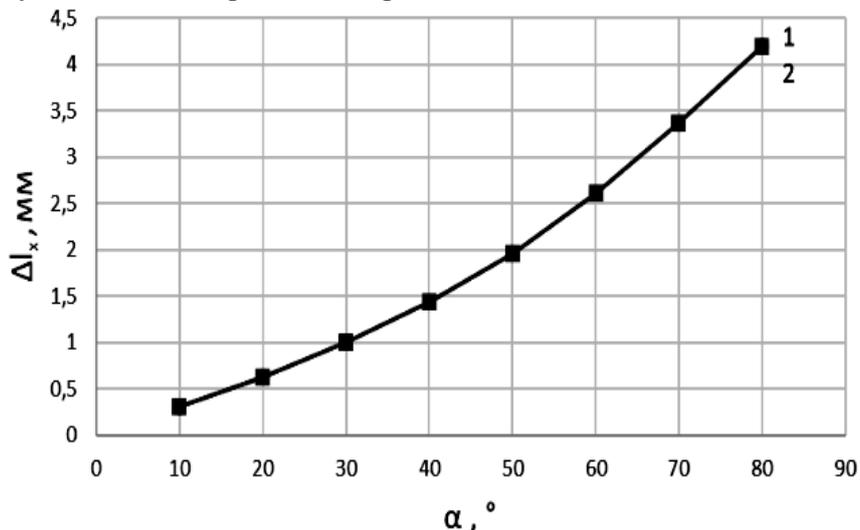


Рис. 4. Расчет изменения смещения оси лазерного излучения от угла наклона пластинок для различных показателей преломления кварца

Полученные предварительные результаты показывают возможность использования разработанной нами автоматической системы на фотоприемнике в диапазоне ± 12 мм в воздушном оптическом канале связи, что больше на 4 мм по сравнению с аналогичными типами разработок [1, 2]. Установленные зависимости для Δl позволяют выбрать параметры оптических компонент и положение их размещения, а также диапазон

управляемых напряжений с учетом требований к массогабаритным характеристикам ВОКС.

Литература

1. Авиев, А.А. Двухкоординатная оптико-электронная система для определения положения кольцевого лазера / А.А. Авиев // Радиооптика. – 2016. - № 2. – С. 11–25.
2. Козлова, Т.И. Метод корректировки положения пучка лазерного излучения / Т.И. Козлова, М.И. Коновальцев, Р.С. Лебедев, О.Л. [Течко // Фотон – экспрес. – 2021. - № 6. – С. 201-205.
3. Popovskiy, N.I. Development to high-rate fiber optic communication line with code division multiplexing / N.I. Popovskiy, V.V. Davydov, I.M. Gureeva // ACM International: Conference Proceeding Series. - 2021. - P. 527–531.

КОМПАКТНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР С ДИОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ И ВЫСОКОЙ ЧАСТОТНОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ

Наумова В.В.

С-Пб. ПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vika_025898@mail.ru

Стабилизированный йодом твердотельный лазер с диодной накачкой (DPSS-лазер) с длиной волны 532 нм является не только хорошим вторичным стандартом частоты, но также является хорошим источником лазера с длиной волны (частотой) для реализации измерителя с использованием лазерной интерферометрии.

Стабилизированные йодом DPSS-лазеры при 532 нм имеют некоторые преимущества по сравнению с традиционными стабилизированными йодом He-Ne лазерами (при 633 нм) при использовании в лазерной интерферометрии смещения. Такие лазеры имеют более высокую мощность (несколько милливатт против примерно 100 мкВт He-Ne лазеров), меньшую длину волны и более высокую стабильность частоты, чем у He-Ne лазеры.

Стабилизированные йодом Nd:YAG-лазеры с длиной волны 532 нм были успешно использованы в интерферометре длинномерного блока и в "нанометровом лазерном интерференционном компараторе" для линейных шкал, линейных энкодеров [1] и т.д.

Многие из лазеров, обычно описываемых во всех ссылках, довольно велики [2-4]. Компактность и малый вес лазера могут быть критическими параметрами для использования в лазерной интерферометрии перемещения; например, в промышленных лазерных интерферометрах и в абсолютных баллистических гравиметрах.

В работе описан малогабаритный лазер с нестабильностью частоты на уровне 10^{-12} при времени усреднения в 1 секунду.

На рисунке 1 показана оптическая схема разработанного лазерного резонатора.

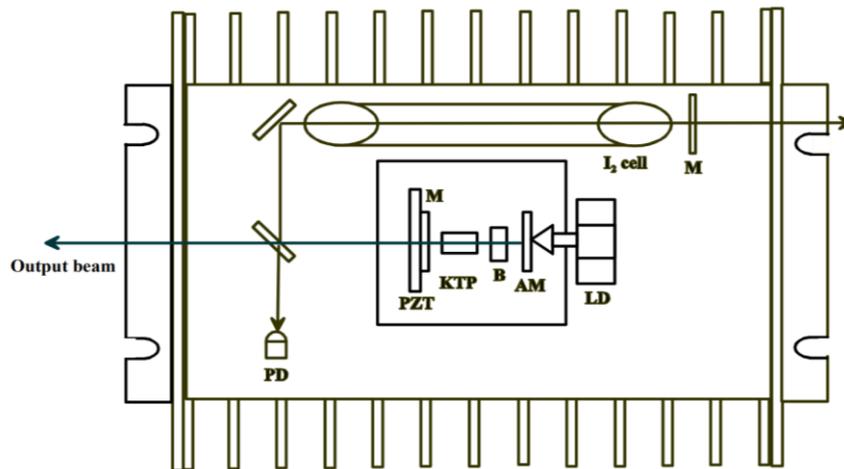


Рис. 1. Оптическая схема лазерного резонатора, стабилизированного йодом $\text{Nd}^{3+}/\text{YVO}_4/\text{KTP}/\text{I}_2$ с длиной волны 532 нм.

Этот линейный резонатор состоит из лазерного диода LD с длиной волны 808 нм, пластины активной среды Nd: YVO₄ AM, пластины Брюстера В, нелинейного кристалла KTP с удвоением частоты и зеркала выходного ответвителя М, установленного на пьезоэлектрическом диске PZT (титанат цирконата свинца). Активная среда Nd:YVO₄, освещаемая лазерным диодом, генерирует излучение с длиной волны 1064 нм. Мощность лазерного диода составляет около 0,5 Вт. Внутриполостной кристалл KTP удваивает частоту этого излучения. PD - это фотоприемник.

Все элементы резонатора и рабочие параметры были выбраны таким образом, чтобы рабочие температуры компонентов находились в диапазоне от 25 °С до 30 °С, т.е. были как можно ближе к комнатной температуре, чтобы облегчить режим работы лазера и снизить энергопотребление.

Лазерный резонатор настроен на длину волны 1064 нм и не чувствителен к обратному отраженному свету при 532 нм. Фильтр с длиной волны 1064 нм удаляет выходное излучение и обратно отраженный свет на этой длине волны. Это позволяет использовать лазер в интерферометре без оптического изолятора.

Выходное лазерное излучение с длиной волны 532 нм из лазерного резонатора разделяется на два луча почти равной интенсивности. Один луч с минимальными искажениями может быть использован в лазерном интерферометре, а второй - в оптической схеме йодной спектроскопии. Часть второго луча, выходящего из лазера, может быть использована, например, для измерения частоты лазера.

Для стабилизации частоты используется метод третьей гармоники [5, 6] с частотой модуляции 3,3 кГц. Стабильность частоты компактного лазера была измерена с использованием стационарного Nd: YAG/MgO: LiNbO₃/I₂ лазера ВРМ при 532 нм.

Была достигнута относительно хорошая частотная стабильность 10^{-12} за время усреднения 1с, но она все равно далека от стационарного лазера. Было выяснено, что это уровень стабильности ограничивается амплитудными шумами лазера, которые в свою очередь определяются флуктуациями лазерной накачки. Принято решения о замене многомодового лазерного диода на одночастотный лазерный диод с объемной Брэгговской решеткой. Применение Брэгговских решеток даёт возможность сужать полосу излучения многомодовых лазерных диодов и линеек лазеров, точно настраивать рабочую длину волн и значительно уменьшить зависимость от температурного воздействия. Уменьшение амплитудных шумов и повышение отношения сигнал/шум в системе стабилизации позволило дополнительно повысить частотную стабильность лазерного излучения.

Был разработан и исследован действительно компактный твердотельный Nd: YVO₄/KTP/I₂-лазер с диодной накачкой, стабилизированный йодом, на длине волны

532 нм. Метрологические (стабильность частоты и воспроизводимость) и технические (мощность лазера, размеры и вес лазерных блоков) характеристики предполагают, что такие лазеры найдут широкое применение в лазерной интерферометрии смещения, включая лазерные интерферометры для абсолютных баллистических гравиметров, а также портативные вторичные стандарты частоты в видимом диапазоне оптических частот.

Литература

1. Flügge, J. Design and first results of PTB's new nanometer comparator/ Flügge, J.// PTB-Bericht PTB-F-45– 2001. – P. 7–22.
2. Feng-Lei Hong Portable I2-stabilized Nd:YAG laser for wavelength standards at 532 nm and 1064 nm/ Feng-Lei Hong, Jun Ishikawa, Tai Hyin Yoon, Long-Sheng Ma, Jun Ye, Hall J. L.// Recent Developments in Optical Gauge Block Metrology – 1998. – P. 2–10.
3. Feng-Lei Hong Portable I2-stabilized Nd:YAG laser for wavelength standards at 532 nm and 1064 nm/ Feng-Lei Hong, Jun Ishikawa, Jun Yoda, Jun Ye, Long-Sheng Ma, John L.// IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT – 1999. – Vol 48(2). – P. 532–536.
4. Gianluca Gaizerano Frequency stabilization of frequency-doubled Nd:YAG lasers at 532 nm by frequency modulation spectroscopy technique/ Gianluca Gaizerano, Elio Bava, Marco Bisi, Fabrizio Bertinotto, Cesare Svelto// IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT– 1999. – Vol. 48(2). – P. 540–543.
5. Okhapkin M.V. Tunable single-frequency diode-pumped Nd:YAG ring laser at 1064/532 nm for optical frequency standard applications, / Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Belkin A.M., Kvashnin N.L., Bagaev S.N.// Optics communications –2002. – Vol. 203. –P. 359–362.
6. Youichi Bitou Compact I2-stabilized frequency doubled Nd:YAG laser for long gauge block interferometer/ Youichi Bitou, Kaoru Sasaki, Shigeo Iwasaki, Feng-Lei Hong// Japanese Journal of Applied Physics – 2003. – Vol. 42(2). – P. 2867–2871.

ПРИМЕНЕНИЕ ССД И КМОП УСТРОЙСТВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

Николаева И.Н.^{1,2}, Рогожников Г.С.²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, филиал в г.Сарове, Саров, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Саров, Россия

E-mail: NikolaevaIN@my.msu.ru

Особенностью работы в субмиллиметровом диапазоне длин волн ($f \sim 1-10$ ТГц) является прозрачность для излучения большинства диэлектриков, что усложняет использование традиционного лабораторного оборудования [1]. Необходимы оптические элементы, выполненные из полимерных материалов, имеющих для терагерцовых волн коэффициент преломления отличный от единицы [4], а также специально спроектированные оптико-электронные регистрирующие устройства. Последние являются достаточно сложными, дорогостоящими, инертными и имеют невысокое пространственное разрешение [5], что ставит вопрос о поиске подходящих доступных аналогов.

Сравнительно недавно [2] было предложено использовать для регистрации субмиллиметрового излучения обычные ПЗС и КМОП матрицы, работающие в режиме туннелирования фотоэлектронов в зону проводимости полупроводниковых структур за счет эффекта Франца-Келдыша. Проведенные эксперименты показали возможность детектирования узких терагерцовых пучков с высоким пространственным разрешением [3].

В данной работе рассмотрены особенности регистрации модулированного электромагнитного излучения в расширенном миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн ($f \sim 0.1-1$ ТГц) с помощью подобных [3] матричных фотоприемных устройств на основе ПЗС и КМОП структур.

Литература

1. Lee, Y., Principles of terahertz science and technology. USA, Springer, 2009.
2. Shalaby, M., Vicario, C., Hauri C.P. High-performing nonlinear visualization of terahertz radiation on a silicon charge-coupled device // Nature communication. 2015. 6:8439.
3. Shalaby, M., Vicario, C., Hauri C.P. Single-silicone CCD-CMOS platform for multi-spectral detection from terahertz to x-rays // Optics Letters. 2017. Vol. 42. No. 22.
4. <https://www.tydexoptics.com>
5. <https://www.ophiropt.com>

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПИГМЕНТОВ В ПРОИЗВЕДЕНИЯХ ИСКУССТВА

Олейник Е.А.¹, Кожина Е.П.², Бедин С.А.³

*Московский педагогический государственный университет,
Институт физики, технологии и информационных систем, Москва, Россия*
E-mail: mickjaggernaut@mail.ru

Изучение картин дает возможность отличить подделки от оригинала, определить время написания, авторство, путем установления химического состава красок, холста и т. д., так как в разные времена разные художники использовали разные материалы, пигменты, по-разному готовили краски.

Существуют различные методы физико-химического анализа, которые применяются на всем полотне, не повреждая его: микроскопия в видимом и УФ диапазоне, рентгенография и др.

Однако, некоторые данные можно получить только благодаря более сложным методам, анализируя соскобы с разных слоев картины. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) или Рамановская спектроскопия – метод, основанный на действии света. Спектроскопия позволяет получить информацию о свойствах, которую не получить другими методами. Рамановская спектроскопия - эффективный и неразрушающий способ исследования произведений искусства [1], его можно использовать для анализа продуктов коррозии на поверхности артефактов (статуй, глиняной посуды и т. д.), что может дать представление о коррозионной среде, в которой находятся артефакты. Полученные спектры также можно сравнить со спектрами поверхностей, которые очищены или намеренно корродированы, что может помочь в определении подлинности ценных исторических артефактов. Также он позволяет идентифицировать отдельные пигменты в картинах и продукты их разложения, который может дать представление о методах работы художника в дополнение к помощи в аутентификации картин. Он также дает информацию об исходном состоянии картины в тех случаях, когда пигменты деградировали с возрастом.

Одной из самых распространенных техник написания картин является темпера. Техника основана на применении в качестве основы яичного белка или желтка (или их смесей) совместно с неорганическими красителями. Для идентификации отдельных компонентов краски, приготовленной по данной технике, надо иметь данные спектров отдельных компонентов.

В данной работе мы проводили спектрометрический анализ краски и отдельных ее составляющих (Рис.1). Были получены спектры белка, желтка, пигмента и их смесей. Проводятся работы по накоплению спектроскопических данных отдельных компонентов, что позволит в перспективе определить их характерные пики в смесях и на поверхности полотен.

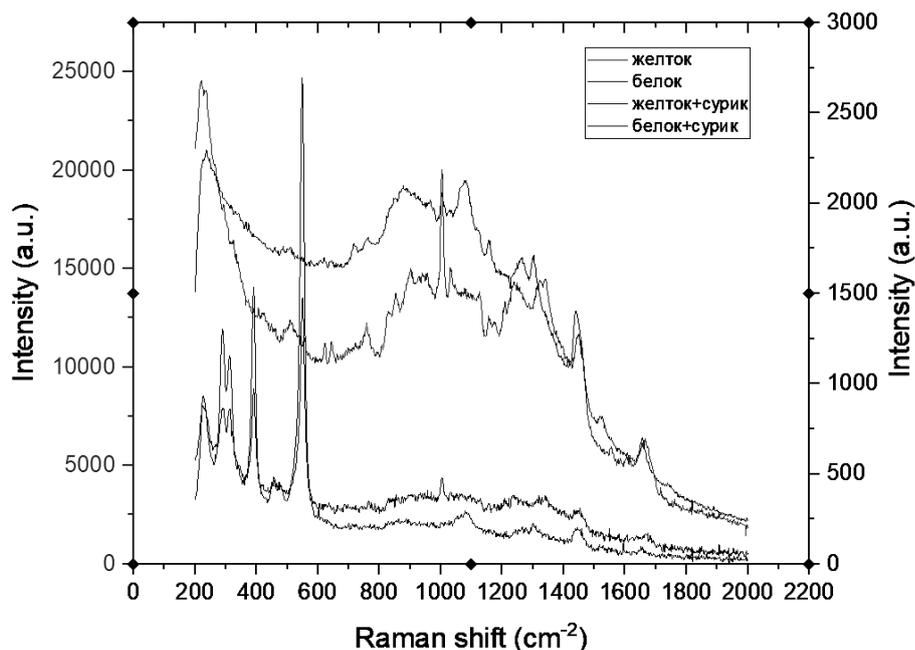


Рис. 1. Спектры белка, желтка и их смесей с пигментом

Литература

- Navas, N., Romero-Pastor, J., Manzano, E., & Cardell, C. (2010). Raman spectroscopic discrimination of pigments and tempera paint model samples by principal component analysis on first-derivative spectra. *Journal of Raman Spectroscopy*, 41(11), 1486–1493.

МЕТОД МАТРИЦ ПЕРЕНОСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Павлов А.А.

Северо-Восточный ФУ им М. К. Аммосова, Физ.-тех. институт, г. Якутск, Россия

E-mail: alexey jr00@mail.ru

Метод матриц переноса позволяет весьма эффективно определять оптические свойства многослойных гетероструктур. Этот способ моделирования поведения световой волны в тонкопленочных материалах раскрывает особенности изменения волновой функции. Одним из важных преимуществ метода является широкая масштабируемость, а именно возможность задать любое количество слоев практически любых тонкопленочных материалов. Это, в свою очередь, позволяет с достаточной точностью прогнозировать изменения световой волны при прохождении через слои материалов, без необходимости воссоздавать физически гетероструктуры.

В общем, метод матриц переноса можно представить следующим образом:

$$M = \prod_{i=0}^N I(z_i) * P(z_i, z_{i+1}) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где I – матрица интерфейсов, P – матрица распространения.[1]

В данной работе представлен анализ метода матриц переноса для определения коэффициентов отражения и пропускания. Рассматривалась однослойная структура Si . В численных расчетах предполагалось, что слои являются однородными и изотропными.

Представлены численные результаты для коэффициентов отражения и пропускания однослойного Si толщиной 1 мкм в оптическом диапазоне.

Как показали численные результаты, полученные значения коэффициента отражения R и коэффициента пропускания T отличаются от литературных данных [2]. Обосновано это может быть с погрешностью самого метода. Из литературных данных известно, что метод матриц переноса ведет себя не стабильно при длинах волн, $\lambda \leq 750$ нм. Также, следует отметить, метод матриц переноса численно нестабилен для относительно толстых слоев $> 100\text{Å}$. Численная нестабильность заключается в невозможности масштабирования матрицы распространения вида (1), т.к. показатель преломления входящая в экспоненциальное выражение – комплексная величина и как следствие выражение (1) будет содержать как малые, так и большие значения, что и приводит к численной нестабильности.

Литература

1. Sergey A. Dyakov, Vladimir A. Tolmachev. Numerical methods for calculation of optical properties of layered structures. 2014.
2. M. N. Polyanskiy, "Refractive index database," <https://refractiveindex.info>. Accessed on 2023-02-15.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СПЕКЛОПОДОБНЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ В РАМКАХ УЧЕБНЫХ МОДУЛЕЙ КАФЕДРЫ ОПТИКИ, СПЕКТРОСКОПИИ И ФИЗИКИ НАНОСИСТЕМ

Павлов Н.Н., Короленко П.В., Тулапин Ф.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: np5012@yandex.ru

Сохраняет актуальность проблематика, связанная с изучением свойств спеклоподобных световых структур с различными статистическими характеристиками [1, 2]. В последнее время они используются при построении фантомных изображений, при совершенствовании методов динамической микроскопии, при реализации сверхразрешения в оптических системах, а также при бездифракционном распространении световых пучков.

В данной работе описан оригинальный метод получения фрактальных спекловых световых пучков, позволяющих в широких пределах менять их статистические и скейлинговые характеристики. Программное обеспечение, реализующее указанный метод, было использовано при создании учебной задачи в компьютерном разделе специального практикума кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем. Задача включала в себя две части. В первой части студент по заданию преподавателя должен был осуществить численное моделирование световых пучков с фрактальной структурой распределения интенсивности. При проведении моделирования использовались свойства двумерной фрактальной функции Вейерштрасса со случайными фазами её гармоник. В ходе моделирования учащийся должен был освоить навыки получения пространственных спектров моделируемого излучения, распределение плотности вероятности структуры автокорреляционной и структурной функций. Особое внимание студент должен был уделять методу расчета фрактальной размерности. В данной задаче фрактальная размерность определяется по поведению структурной функции, представленной в двойном логарифмическом масштабе. Во второй части (экспериментальной) учащийся должен был собрать на базе учебно-научной кафедральной установки оптическую систему, позволяющую с использованием лазера фиксировать на экране распределение спеклов, формирующихся в результате рассеяния излучения на неоднородной фазовой пластине. При сборе оптической системы студент должен установить, как зависят от геометрии расположения оптических элементов размеры отдельных спеклов. Зарегистрированная с помощью CCD камеры картина распределения интенсивности передавалась в компьютер. В нём экспериментальные данные обрабатывались с помощью программы, кото-

рая использовалась и в теоретической части. При этом использовались возможности вычислительного пакета MathCAD. Это позволяло студентам наглядно убедиться в справедливости численных моделей, используемых для создания модельных спеклов. Особенность используемой в эксперименте оптической системы состояла в том, что она позволяла путём внесения в исследуемый пучок некогерентной компоненты качественно менять статистику спекловой структуры. У студентов была возможность наблюдать переход от релеевской статистики к нерелеевской, можно было убедиться, что существует возможность контролируемых изменений статистических характеристик двумерных структур.

Предполагается, что созданная задача будет предложена для выполнения студентам, осваивающим на кафедре учебные курсы по статистической и когерентной оптике.

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику кафедры оптики Зотову Алексею Михайловичу за вклад в создание необходимого программного обеспечения.

Литература

1. Гудмен Дж.//Статистическая оптика, М.: Мир, 1988.
2. Короленко П.В.//Оптика когерентного излучения, М, 1993.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОСЕВОЙ ГОЛОГРАФИИ ГАБОРА

Платонов В.В.

Северо-Восточный федеральный университет им М. К. Аммосова, г. Якутск

E-mail: platon2345@gmail.com

Цифровая осевая голография является актуальной исследовательской областью в оптотехнике, микроэлектронике и материаловедении. Она позволяет исследовать микро- и наноструктуры, которые невозможно изучать с помощью традиционных методов. В частности, цифровая осевая голография используется для исследования физико-механических свойств многослойных оптических структур, светодиодных дисплеев, интегральных схем. В настоящее время исследования в этой области активно развиваются.

Отличием цифровой осевой голографии от классической голографии Габора[1] является то, что регистрация в первом случае осуществляется напрямую на ПЗС-матрицу или на цифровой аппарат. Классический подход подразумевает регистрацию на некоторый фоточувствительный элемент или координатно-чувствительный детектор (в случае электронной микроскопии) [6-8].

Принципиальная схема цифровой осевой голографии (Рис.1) чрезвычайно проста, но в то же время весьма эффективна и перспективна.

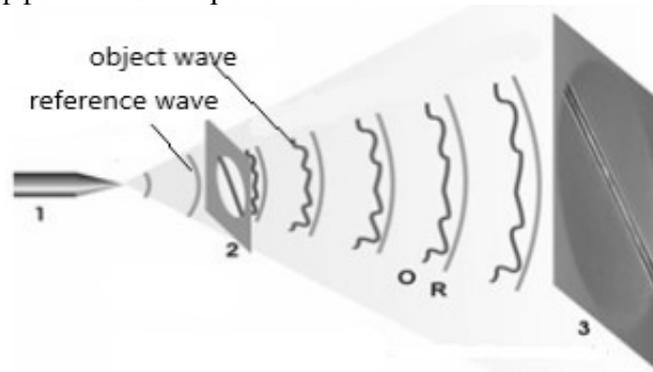


Рис.1. Принципиальная схема осевой голографии Габора. 1 – источник; 2 – плоскость объекта; 3 – плоскость регистрирующей среды; R и O – опорная (волна, прошедшая без взаимодействия) и объектная волны (вторичные волны от объекта) соответственно.

В рамках данной работы предлагается разработка схемы осевой голографии Габора в оптическом диапазоне и проведение натуральных исследований. Под оптическим диапазоном подразумевается длина волны $\lambda = 632$ нм.

Работа фактически состоит из двух этапов. В данной работе представлены результаты первого этапа, где была реализована схема осевой голографии Габора в лабораторной установке. Представлены результаты натуральных исследований с металлической проволокой с диаметром 0.14 мм. Основным недостатком такой схемы является его ограниченность и непереносимость в силу реализации его на лабораторных приборах.

Второй этап работы будет связан со сборкой схемы представленной на Рис.1, основным достоинством которой будет являться переносимость и динамичность по времени при регистрации.

Литература

1. D. Gabor. A new microscope principle // Nature 161. 1948. pp. 777–778.
2. D. Gabor. Microscopy by Reconstruction wave-fronts // Proc. Roy. Soc. Series A. V. 197. No. 1051. 1949. pp. 454–487.
3. D. Gabor. Microscopy by reconstructed wave-fronts: II // Proc. Phys. Soc. B64. 1951 pp. 449–469.
4. E.N. Leith and J. Upatnieks. Wavefront reconstruction with continuous-tone objects // J. Opt. Soc. Am. 53. 1963. pp. 1377–1381.
5. P. Hariharan, Optical Holography: Principles, Techniques, and Applications, 2 ed. CambridgeUniversityPress, Cambridge, UK 1996.
6. J. C. H. Spence, Experimental High-Resolution Electron Microscopy (Oxford University Press, New York, 1988).
7. H.-W. Fink, W. Stocker, H. Schmid. PhysicalReviewLetters 65(10), с. 1204-1206 (1990).
8. N. V. Egorov, V. V. Trofimov, S. R. Antonov, A. G. Fedorov, and L. I. Antonova. Studying the Electrophysical Parameters of a Holographic Microscope // Journal of Surface Investigation. X-ray, SynchrotronandNeutronTechniques, 2014, Vol. 8, No. 4, pp. 745–747.

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛА В ЖИДКОСТЬ

Путилов А.Г., Шепелев А.Е., Антипов А.А.

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН», Шатура, Россия
E-mail: putilov.iplit@yandex.ru

Исследование синтеза наночастиц меди обусловлено их уникальными свойствами по сравнению с объемными материалами и применением в различных областях. В последнее время наночастицы меди находят применение в формировании проводящих пленок, создании нелинейных устройств и бактерицидных агентов [1]. Синтезированные наночастицы обладают высокой активностью и практически сразу же готовы к применению [2].

Коллоидные растворы меди формировались методом лазерной абляции материала в жидкость. В жидкость: дистиллированная вода и глицерин помещалась медная мишень. Плотность энергии лазерного излучения на медной мишени была от 33 до 52 Дж/см² [3]. Скорость сканирования не превышала 2 мм/с. При воздействии на мишень с частотой 5 Гц средний размер частиц составляет порядка 20 нм, увеличение частоты лазерного излучения до 15 Гц приводит к увеличению среднего размера частиц до 150 нм. Такое увеличение связано с изменением профиля лазерного пучка, так как увеличение частоты приводит к увеличению тепловой линзы. Спектр поглощения для коллоидных растворов с синтезированными наночастицами меди находился в области ~520 нм.

Дальнейшие экспериментальные исследования направлены на формирование тонких кластерных пленок. Кластерные пленки формировались на твердой диэлектрической подложке методом капельного осаждения. В первой серии эксперименты проводились в естественных условиях при температуре 25 °С. В процессе высыхания формируется кластерная тонкая пленка с четко выраженной границей и равномерно осажденными частицами в центре. Вторая серия экспериментов посвящена вынужденному испарению жидкой среды с использованием лазерного излучения. Осажденная поверхность представляет островковую пленку т.к. происходит конкуренция двух процессов диффузии наночастиц из области нагрева и гидродинамическое течение в область нагрева.

Наночастицы меди наименьшего размера синтезируются при энергии 52 Дж/см², частоте следования 5 Гц и скорости сканирования 2 мм/с. Увеличение частоты приводит не только к изменению профиля пучка, но и увеличению среднего размера частиц. Продемонстрировано формирование кластерных пленок в процессе естественного и вынужденного испарения жидкой фазы.

Литература

1. Fernández-Arias, M., Boutinguiza, M., del Val, J., Covarrubias, C., Bastias, F., Gómez, L., Maureira, M., Arias-Gonzalez, F., Riveiro, A., & Pou, J. Copper nanoparticles obtained by laser ablation in liquids as bactericidal agent for dental applications // *Applied Surface Science*, 507, 145032. (2020).
2. Kucherik, A. O., Ryabchikov, Y. V., Kutrovskaya, S. V., Al-Kattan, A., Arakelyan, S. M., Itina, T. E., & Kabashin, A. V.. Cavitation-Free Continuous-Wave Laser Ablation from a Solid Target to Synthesize Low-Size-Dispersed Gold Nanoparticles // *Chemphyschem: a European journal of chemical physics and physical chemistry*, 18(9), 1185–1191. (2017)
3. Антипов А.А., Путилов А.Г., Осипов А.В., Шепелев А.Е., Лазерная абляция металлических мишеней в жидкости цугами наносекундных импульсов // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. Т.86. №6. С.853-858 (2022).

КОЛОРИМЕТРИЯ ТЕРМОИНДУЦИРОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КРАСОЧНЫХ СЛОЁВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ДРЕВНЕРУССКУЮ ФРЕСКОВУЮ ЖИВОПИСЬ

Пушистова А.С. *, Крамарев Е.Г. *, Кононова Е.М. **, Анисимова Т.И. **,
Балахнина И.А. *, Брандт Н.Н. *

* МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

** Центр реставрации монументальной живописи, Новгородский государственный
объединённый музей-заповедник, Великий Новгород, Россия

E-mail: pushistova.anna@yandex.ru

В современном мире повышается интерес к исследованию объектов культурного наследия, в том числе и к произведениям древнерусской фресковой живописи [1, 2]. В такой живописи красочный слой представляет собой порошок пигмента, нанесённый на сырую известковую штукатурку. С момента создания некоторые исторические объекты подвергались внешнему агрессивному воздействию, например пожару, в результате чего живопись могла изменить свои характеристики. Так, например, за всю историю существования Великого Новгорода – центра древнерусской фресковой живописи – в городе от пожаров пострадали сотни храмов. В зависимости от материалов, использовавшихся при создании фресок, термическое воздействие может изменять оптические характеристики красочных слоёв.

Одной из задач научного исследования является количественное определение цвета. Для этого используются координаты различных цветовых палитр, которые могут быть определены непосредственно при помощи трёхцветных колориметров или компа-

раторов цвета, либо могут быть получены путём преобразования спектров электронного поглощения с помощью соответствующего программного обеспечения.

В работе была поставлена задача провести контролируемое термическое воздействие на модельные образцы модельных красочных слоёв фресковой живописи разного цвета и проследить за изменениями их цветовых характеристик.

В качестве образцов были использованы красочные слои на водной основе, нанесённые на влажную штукатурку, приготовленную согласно древнерусским рецептам.

Температурное воздействие проводилось в духовом шкафу с постепенным повышением температуры без контроля влажности. Температура менялась от 100 до 1100 °С, время выдерживания образца после достижения заданной температуры составляло 10 минут.

До и после термического воздействия были измерены спектры электронного поглощения на спектрофотометре Evolution 220 (Thermo Electron Corporation) с интегрирующей сферой. Диапазон измерений составлял 380-730 нм, спектральное разрешение – 1 нм, время накопления спектра – 175 секунд. Полученные спектры были преобразованы в цветовые координаты пространства CIE L*a*b* с помощью программного продукта VISIONlite™ ColorCalc (Thermo Scientific).

В докладе обсуждаются изменения цветовых координат образцов в результате их нагрева.

Работа выполнена за счёт средств гранта РФФИ № 21-78-10077.

Литература

1. Vincenza Crupi, et al. Multi-analytical study of Roman frescoes from Villa dei Quintili (Rome, Italy). *Journal of Archaeological Science: Reports* – 2018 – V. 21. P. 422–432.
2. Balakhnina I, Anisimova T, Mankova A, Chikishev A, Brandt N. Raman microspectroscopy of fresco fragments from the Annunciation Church at Gorodishche at Veliky Novgorod. *Eur. Phys. J. Plus.* 2021 Jun;136(6):610.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ОПТИЧЕСКОГО ПРОПУСКАНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНОЙ ПЛЁНКИ

Распопова С.Н.¹, Полунин К.С.²

¹*РХТУ им. Д.И. Менделеева, Институт материалов современной энергетики и нанотехнологий, Москва, Россия*

²*ФИС химической физики им. Н.Н. Семёнова, Москва, Россия*

E-mail: raspsofya2002@gmail.com

В настоящее время полиэтилентерефталатные (ПЭТФ) плёнки рассматриваются как перспективная подложка для создания радиохромных дозиметров, применяемых при проведении диагностики и радиотерапии онкологических заболеваний [1]. Поэтому является актуальным изучение оптических характеристик ПЭТФ плёнок российского производства, на основе которых возможно производство отечественных радиохромных дозиметров.

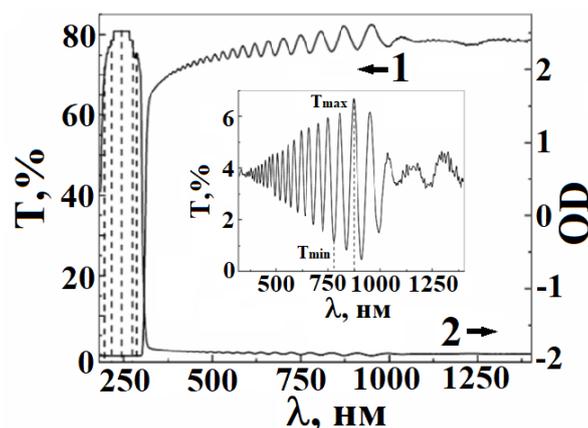


Рис. 1. Спектры оптического пропускания (1) и поглощения (2) полиэтилентерефталатной плёнки толщиной 3 мкм. На вставке показана интерференционная картина, наблюдаемая в оптических спектрах

Цель настоящего исследования состояла в анализе спектров оптического пропускания тонких плёнок ПЭТФ (толщиной ~ 3 мкм), изготовленных в АО «Межотраслевой институт переработки пластмасс - НПО «Пластик»» (г. Москва)

Изучали образцы плёнок ПЭТФ (ГОСТ 24234-80) размерами 20×10 мм, которые были вырезаны из рулонированного материала. Спектры оптического пропускания в спектральном диапазоне 185 – 1400 нм измеряли на воздухе при комнатной температуре с помощью спектрофотометра УФ, видимого и ИК диапазона Shimadzu UV-2600 (рис. 1). В качестве эталона использовали пластинку BaSO_4 .

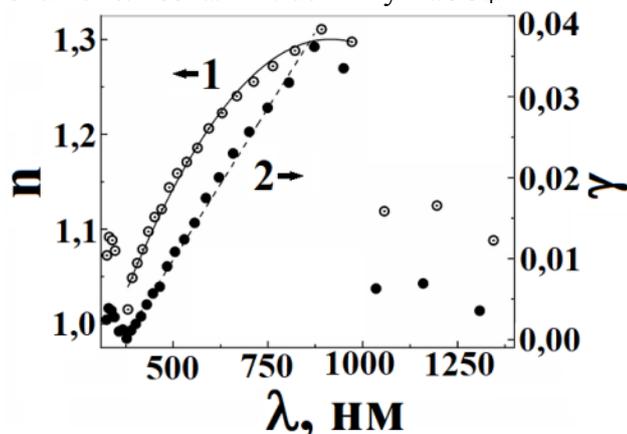


Рис. 2. Спектральные зависимости показателя преломления и контраста интерференционной картины, зарегистрированной в спектре оптического пропускания полиэтилентерефталатной плёнки толщиной 3 мкм

Рассчитанный из зарегистрированного спектра оптического пропускания ПЭТФ плёнки, спектр оптического поглощения в области длин волн от 185 до ~ 340 нм содержит ряд перекрывающихся интенсивных полос поглощения с максимумами при 200,1; 210,7; 243,6; 272,6; 287,1 нм. Происхождение этих полос может быть связано с хромоформными группами, содержащимися в мономерном звене и/или образовавшимися в полимере в процессе его изготовления (рис. 1).

В области 325 – 1400 наблюдается интерференционная картина, включающая 28 полных колебаний. Как следует из рис. 1,2, в спектральных диапазонах 325 – 375 нм и 1000 – 1400 нм интерференционная картина искажена из-за сильного оптического поглощения и нестабильности работы зондирующего источника света, соответственно. Спектральные зависимости показателя преломления и контраста, рассчитанные при помощи известных соотношений [2], практически одинаковы (рис. 2). Получена оценка толщины плёнки $\sim 3,05 - 3,07$ мкм для участка интерференционной картины, наблюдаемого в области 800 – 1000 нм, что хорошо согласуется с данными производителя.

Исследование выполнено при поддержке целевой программы финансирования научных групп, сотрудничающих в рамках проекта «Комплекс НИСА» в 2023 году, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «НИЯУ МИФИ «Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников». Авторы благодарят З.З. Каракашьяна и Т.А. Иваненко за любезно предоставленные образцы ПЭТФ плёнок, и С.М. Рындя за помощь в измерении спектров оптического пропускания.

Литература

1. Butson M.J., Yu P.K.N., Cheung Tsang, Metcalfe P. Radiochromic film for medical radiation dosimetry // Mater. Sci. and Eng. R. 2003. V. 41. P. 61 – 120. doi:10.1016/S0927-796X(03)00034-2
2. Толстой В.П. Введение в оптическую абсорбционную спектроскопию наноразмерных материалов. СПб.: Изд-во “СОЛО“, 2014. 187 с.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИХ СВИНЦОВЫХ ГАЛОГЕНИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ

Рубцова Е.Д.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: rubtsova-liza98@yandex.ru

В последние несколько лет активно ведутся поиски новых сцинтилляторных материалов. Особое внимание уделяется веществам, которые способны обеспечить высокое временное разрешение при детектировании ионизирующего излучения. Для этой области большой интерес представляют полностью неорганические и гибридные органо-неорганические галогениды свинца со структурой перовскита (общая формула $APbX_3$, где $X = Cl, Br, I$). Этот класс материалов характеризуется чрезвычайно короткими временами затухания люминесценции (< 1 нс) по сравнению с традиционными сцинтилляторами [1]. Согласно теоретическим расчетам энергетическая структура перовскитов вблизи запрещенной зоны преимущественно формируется свинцово-галогенидной частью соединений: PbX_6 . В то же время варьировать ширину запрещенной зоны и длину волны люминесценции перовскита можно не только изменением X , но и используя различные катионы A [2]. При этом влияние катиона A на другие свойства перовскитов изучено мало.

Большой интерес представляет сравнение люминесцентных характеристик полностью неорганических ($A = Cs^+$) и гибридных органо-неорганических ($A = MA^+ = CH_3NH_3^+$) перовскитов. В данной работе представлены результаты исследования люминесцентных свойств монокристаллов перовскитов $MAPbCl_3$, $MAPbBr_3$, $CsPbCl_3$, а также твердого раствора $MAPbBr_{1.5}Cl_{1.5}$ в широком диапазоне температур (13 — 300 К) и плотностей возбуждения n_0 (10^{18} - 10^{22} cm^{-3}).

При высокой температуре спектры люминесценции перовскитов представляют собой одну полосу, которую традиционно относят к свечению свободных экситонов. Длина волны люминесценции перовскитов меняется в зависимости от их состава, причем при увеличении размеров аниона запрещенная зона E_g соединения уменьшается (для $MAPbCl_3$ пик люминесценции приходится на 3.1 эВ, для $MAPbCl_{1.5}Br_{1.5}$ — на 2.6 эВ, для $MAPbBr_3$ - на 2.3 эВ), а при увеличении размеров катиона — E_g увеличивается (пик люминесценции $CsPbCl_3$ расположен на 3.0 эВ).

Для всех исследованных материалов наблюдается заметное температурное тушение люминесценции. При комнатной температуре световой выход (СВ) перовскитов составляет $< 1\%$ от максимального. В то же время на эти процессы в перовскитах заметное влияние оказывают плотностные эффекты: для всех материалов при большой плот-

ности возбуждения $n_0 \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ падение СВ при нагревании образцов от 13 К до комнатной температуры оказывается в разы меньше, чем при низкой n_0 .

Кинетика затухания люминесценции всех перовскитов субнаносекундная, однако наблюдаются различия в ее зависимости от плотности возбуждения. Для MAPbBr_3 увеличение n_0 приводит к замедлению кинетики, начиная с плотностей $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, для CsPbCl_3 этот порог значительно выше $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$, а кинетика MAPbCl_3 практически не зависит от плотности возбуждения в исследованном диапазоне n_0 .

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации № 075-15-2021-1353 и РФФИ № 20-02-00688

Литература

1. Birowosuto M.D. et al. X-ray Scintillation in Lead Halide Perovskite Crystals // Sci Rep. 2016. Vol. 6, № 1. P. 37254.
2. Chang Y.H., Park C.H., Matsuishi K. First-Principles Study of the Structural and the Electronic Properties of the Lead-Halide-Based Inorganic-Organic perovskites $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbX}_3$ and CsPbX_3 (X = Cl, Br, I) // Journal of the Korean Physical Society. — 2004. — Vol.44, № 4. — P. 889.

ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛОСКИХ ЭКСИТОНОВ ВАНЬЕ ЗАКРУЧЕННЫМИ ФОТОНАМИ

Рякин В.А.

Национальный исследовательский Томский ГУ, Томск, Россия

E-mail: vlad.r.a.phys@yandex.ru

Низкоэнергетические электроны и электронные дырки заключенные в тонкой полупроводящей пленке или моноатомном слое образуют плоский экситон [1]. В последнее время, исследования свойств таких двумерных экситонов привлекли значительное внимание многих научных групп при изучении монослоев дихалькогенидов переходных металлов и фосфорена [2]. Эти материалы представляют собой примеры структур с прямой запрещенной зоной и относительно небольшой диэлектрической восприимчивостью, входящей в потенциал электронно-дырочного взаимодействия. В результате электромагнитные волны легко создают в этих структурах плоские экситоны, которые обладают большими энергиями возбуждения и достаточно большим временем жизни [3]. Изучение свойств таких экситонов сталкивается со многими техническими проблемами. В частности, точная форма эффективного потенциала электронно-дырочного взаимодействия неизвестна, и в литературе представлены различные модели, описывающие это взаимодействие [1]. В данном докладе предлагается использовать так называемые закрученные фотоны для исследования формы потенциала электронно-дырочного взаимодействия.

Закрученные фотоны — это состояния электромагнитного поля с определенной проекцией полного углового момента [4]. Они являются относительно новым инструментом для исследования свойств твердых тел. Благодаря тому, что закрученный фотон несет определенную проекцию полного углового момента, которая может быть больше единицы, его можно использовать для возбуждения вращательных степеней свободы материала способом, недоступным при дипольных переходах, и тем самым исследовать квантовую динамику этих степеней свободы. В частности, закрученные фотоны могут создавать экситоны в состояниях с большой проекцией полного углового момента [5]. В данной работе показано, что вероятности фотовозбуждения уже созданного экситона определяются матричными элементами оператора $\hat{g} \cdot \mathbf{m}$. Знание этих матричных элементов сильно ограничивает возможные модели для потенциала электронно-дырочного взаимодействия. Более того, энергии перехода также зависят от проекции полного уг-

лового момента, переданного экситону, в случае, когда этот потенциал отличен от кулоновского. Те же выводы справедливы для вероятностей фотовозбуждения электронного и дырочного состояний, связанных с заряженной примесью. Поэтому закрученные фотоны могут быть использованы для исследования потенциала взаимодействия и в этом случае. Доклад основан на результатах работы [6].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, госзадание № FSWM-2020-0033.

Литература

1. V. L. Ginzburg, V. V. Kelle, Surface excitons of electron-hole type and collective phenomena associated with them // *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 17, 428 (1973) [*JETP Lett.* 17, 306 (1973)].
2. G. Berghäuser, E. Malic, Analytical approach to excitonic properties of MoS₂ // *Phys. Rev. B* 89, 125309 (2014)
3. G. Wang et al., Excitons in atomically thin transition metal dichalcogenides // *Rev. Mod. Phys.* 90, 021001 (2018).
4. M. J. Padgett, Orbital angular momentum 25 years on // *Opt. Express* 25, 11265 (2017).
5. A. M. Konzelmann, S. O. Krüger, H. Giessen, Interaction of orbital angular momentum light with Rydberg excitons: Modifying dipole selection rules // *Phys. Rev. B* 100, 115308 (2019).
6. P.O. Kazinski, V.A. Ryakin, Photoexcitation of planar Wannier excitons by twisted photons // arXiv:2209.14167v1

ВЛИЯНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Семенов К.Ю.^{1,2}, Васнев Н.А.², Тригуб М.В.²

¹*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

²*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева, Томск, Россия*

E-mail: semenovkostya98@gmail.com

В современном мире существуют процессы, протекание которых сопровождается мощной широкополосной фоновой засветкой. Например, сварка, лазерная абляция мишеней из тугоплавких оксидов [1], самораспространяющийся высокотемпературный синтез [2] и т.п. Визуально-оптический контроль таких процессов стандартными способами затруднен, поэтому целесообразно использовать лазерные мониторы – системы на основе активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов [3].

Корректность интерпретации получаемой информации (серии кадров) с помощью таких систем во многом зависит от стабильности численных показателей качества, а именно, яркости формируемых изображений и поля зрения. Для увеличения каждого из этих параметров применяют бистатическую схему лазерного монитора [3], которая содержит два идентичных активных элемента (АЭ) на парах металлов. В этом случае яркость изображения, поля зрения и их стабильность зависят от временного согласования импульсно-периодических режимов работы активных элементов – особенно это хорошо заметно при минимальной экспозиции видеорегирующей аппаратуры. Последовательность импульсов излучения каждого АЭ не является идеально-периодической и характеризуется временным джиттером в наносекундном диапазоне [4]. Величина джиттера связана с техническими особенностями накачки активных элементов. В работе [5] показано, что синхронизация источников накачки двух активных элементов по цифровому каналу сопровождается джиттером импульсов излучения в 33 нс, а при использовании высоковольтного устройства синхронизации джиттер составляет не более 7 нс. Очевидно, что при меньшем джиттере импульсов излучения обеспечивается более

высокая стабильность яркости формируемых изображений и поля зрения. Следовательно, минимизация джиттера в таких системах является важной задачей.

Одним из параметров, который влияет на джиттер импульсов накачки АЭ, является стабильность питающего напряжения. Изначально была проведена оценка влияния стабильности питающего напряжения на интенсивность излучения одного АЭ на парах бромида меди. Эксперимент проводился следующим образом: при помощи осциллографа регистрировалась амплитуда напряжения на газоразрядной трубке (ГРТ) и амплитуда импульса однопроходного излучения при питании от нестабилизированного источника, а в другом случае при питании от импульсного преобразователя со стабилизацией выходного напряжения. Результаты измерений нормированы на среднее значение и представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при питании от нестабилизированного источника размах пульсации напряжения на ГРТ составил 10% и размах амплитуды импульса излучения – 20%. При питании от импульсного преобразователя со стабилизацией выходного напряжения указанные величины составили 2% и 4% соответственно. Снижение относительного уровня пульсации связано с более стабильными параметрами газового разряда в активной зоне и, как следствие, накачкой рабочего вещества.

Далее была произведена оценка джиттера излучения в зависимости от наличия стабилизации питающего напряжения одного из АЭ в схеме бистатического лазерного монитора [3, 4]. Экспериментальные данные показали, что джиттер импульсов излучения АЭ1 относительно импульсов излучения АЭ2 составил 5,3 нс при использовании нестабилизированного источника питания.

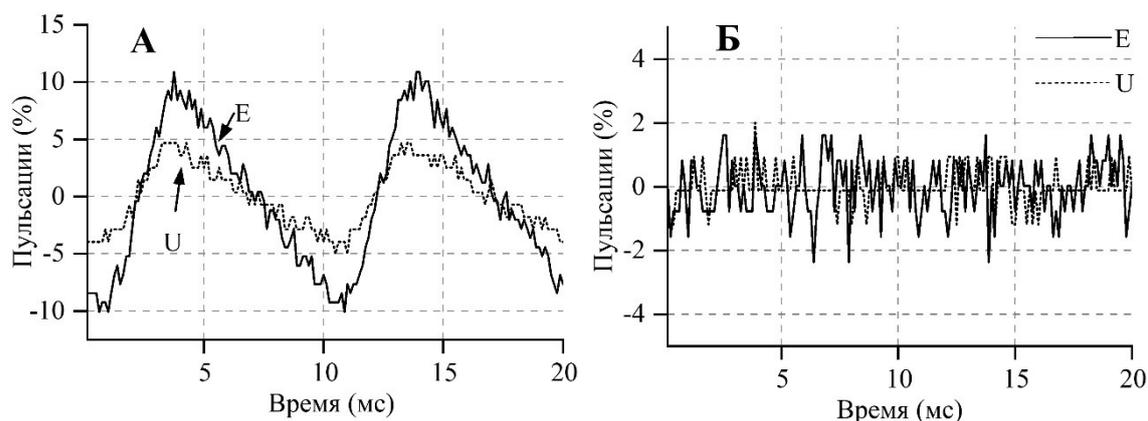


Рис. 1. Относительная пульсация напряжения на ГРТ (U) и излучения (E) при питании от источника без стабилизации А и со стабилизацией Б.

Затем АЭ1 был снабжен импульсным преобразователем со стабилизацией выходного напряжения, что позволило уменьшить джиттер до 4 нс. Снижение джиттера обусловлено большей стабильностью анодного напряжения АЭ1, что влияет на характеристики коммутации тиратрона.

Дальнейшие работы будут направлены на снижение величины джиттера и нестабильности импульсов излучения путем стабилизации питания усилителя яркости в схеме бистатического лазерного монитора, а также блоков нагрева катода и водорода тиратронов.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 19-79-10096-П.

Литература

1. Osipov V.V., Kotov Y.A., Ivanov M.G., Samatov O.M., Lisenkov V.V., Platonov V.V., Murzakayev A.M., Medvedev A.I., Azarkevich E.I. Laser synthesis of nanopowders // *Laser Physics*. – 2006. – Vol. 16, – № 1. – P. 116–125.
2. Концепция развития СВС как области нанотехнического прогресса / под ред. Мержанова А.Г. Черногловка: Территория, 2003. — 368 с

3. Trigub, M.V. Bistatic laser monitor for imaging objects and processes /M.V. Trigub, N.A. Vasnev, G.S. Evtushenko // Appl. Phys. B. – 2020. – Vol. 12. – №33. – <https://doi.org/10.1007/s00340-020-7387-5>
4. Сухарников К.В. Бистатическая схема лазерного монитора / К.В. Сухарников, Ф.А. Губарев // Сборник научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии». – Томск, 2013. – С. 200–206.
5. Васнев Н.А., Тригуб М.В. Способы согласования импульсно-периодических режимов работы двух лазерных активных элементов // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» («INTERMATIC»), – 2018. – С. 815–819.

МИКРОСФЕРНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ С ДОСТИЖЕНИЕМ НАНОМЕТРОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Сенотрусова С.А., Ахметова А.И., Яминский И.В.

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: senotrusova.sa18@physics.msu.ru

В современной микроскопии широко используются оптические методы благодаря своим уникальным преимуществам, таким как высокая разрешающая способность, возможность наблюдения в режиме реального времени при видимом свете и без повреждения образца. Однако существует ограничение, возникающее из-за дифракции: предел разрешения оптических микроскопов при белом свете составляет приблизительно 250 нм [1]. Актуальна задача разработки инструментов, обеспечивающих наблюдение с наноразрешением, которая активно решается с помощью микросфер.

В последние годы исследователи обнаружили, что под источником белого света сферические микролинзы микронного размера обладают возможностями получения изображений со сверхразрешением около 50 нм [2]. Микросфера помещается на поверхность исследуемого образца, являясь дополнительным оптическим «усилителем». Линза фокусирует падающий свет в световое пятно и передает изображение ближнего поля контактирующего с ней объекта в мнимое изображение, которое визуализируется в объективе оптического микроскопа, что позволяет достичь более высокого разрешения. Причиной данной способности является неординарный характер распространения оптического излучения в частице сферической формы, а также разница показателей преломления материала линзы и окружающей среды. Данный метод привлекает значительное внимание благодаря своей простоте реализации и отсутствию необходимости применения меток, что может быть существенно важно для чувствительных биологических образцов.

В работе представлены результаты реализации метода микросферной микроскопии в режимах проходящего и отраженного света. Были проведены исследования с использованием прозрачных микролинз из таких материалов, как BaTiO_3 (диаметром от 20 мкм до 100 мкм), TiO_2 (диаметром от 10 до 60 мкм) и полиметилакрилата (диаметром 9 мкм). Исследования проводились и на воздухе, и в жидкой среде (использовались силиконовое и иммерсионное масла). С помощью микролинзовой оптической микроскопии были получены изображения топологий микросхем, образцов с нанесенным покрытием с полыми структурами от 1 до 20 мкм, а также биологических образцов: красных кровяных клеток, наблюдение которых проводилось в режиме реального времени, благодаря чему была получена визуализация трансформации эритроцита в эхиноцит. В результате было получено разрешение менее 150 нм и преодолен дифракционный предел.

Литература

- 1 Hao X., Kuang C., Gu Z., Wang Y., Li S., KuY., Li Y., Ge J., X.Liu, From microscopy to nanoscopy via visible light. *Light: Science & Applications* № 2, P. 108 (2013)
- 2 [Wang Z., Guo W., Li L., Luk'yanchuk B., Khan A., Liu Z., Chen Z., Hong M.. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope. *Nature communication* 2\(1\) № 218, P.1-6 \(2011\)](#)

**ФОТОТЕПЛОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЕРХМАЛОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Сисина В.В.

МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
E-mail: sisina.vv18@physics.msu.ru

Для современной фотоники необходимы высококачественные оптические среды и созданные на их основе структуры, и устройства, которые в полосе прозрачности обладают низкими коэффициентами поглощения. Прямое измерение малого поглощения сложно или невозможно (чувствительность методов измерения на отражение (R) и пропускание (T) ограничена, как $(1-RT > 10^{-3})$ ^[1]. Очень чувствительны к низким поглощения измерительные методы могут быть реализованы на основе фототепловых методов.

Фототепловая спектроскопия (ФТС) — это группа высокочувствительных методов для определения сверхмалого поглощения и тепловых свойств образца. В основе ФТС лежит детектирование измерения теплового состояния образца, вызванных световым воздействием на него. Наиболее привлекательными для изучения органических полупроводников являются дефлекционные методы фототепловой спектроскопии. Методы основаны на зондировании неоднородного изменения показателя преломления. Один из возможных методов дефлекционной спектроскопии - метод «мираж-эффект». Особенностью этого метода является слабая зависимость фототеплового сигнала от диаметра пучка возбуждения на образце. Кроме того, «мираж-эффект» абсолютно нетребователен к оптическому качеству (прозрачность, однородность, гладкость поверхности) образца, ведь пробный пучок распространяется над ним^[2]. Схема экспериментальной установки представлена *Рис. 1а*.

Целью настоящей работы является освоение методики фототепловой дефлекционной спектроскопии и её применение для измерения сверхмалого поглощения органических тонких пленок, а также расширение динамического диапазона и подготовка для измерения абсолютных величин поглощения имеющегося фототеплового спектрометра. В ходе работы были выявлены причины ограничения динамического диапазона измерений, уровень шумов был понижен до уровня $\Delta V_-/V_+ = 5 \cdot 10^{-6} 1/\sqrt{\text{Гц}}$ в разностном канале, динамический диапазон был расширен до 1000. Был предложен метод калибровки спектрометра на абсолютные значения, показана воспроизводимость измерений на уровне 15%. Также были получены фототепловые спектры поглощения органического кристалла 5,5'-бис[4-(триметилсилил) фенил]-2,2'-бифениола (TMS-PTTP-TMS), показанный на *Рис. 1б*.

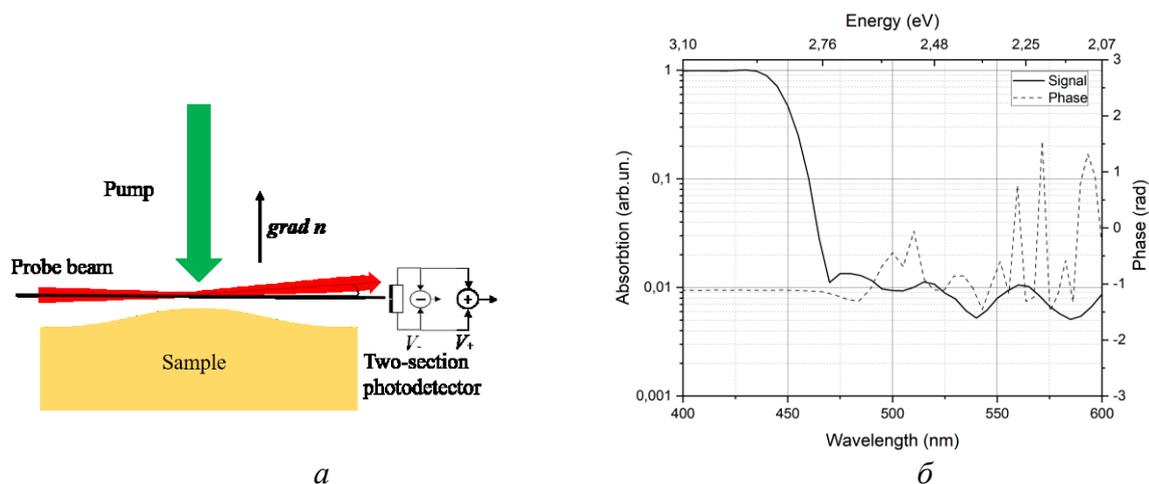


Рис. 1. *a* — схема фототеплового метода на основе «мираж-эффекта»; *б* — фототепловой спектр поглощения органического кристалла TMS-PTTP-TMS.

Благодарности

Автор выражает благодарность Д. И. Доминскому за изготовление исследуемых кристаллов, И. В. Головнину за помощь в модернизации экспериментальной установки, а также своему научному руководителю Д. Ю. Парашуку за руководство работой и содействие на всех этапах работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-79-10122.

Список литературы

1. Jackson W. B., Amer N. M., Voccaro A. C., Fournier D. Photothermal deflection spectroscopy and detection // *Applied Optics*. _ 1981. _ Vol. 20, № 8. _ P.
2. Voccaro A. C., Fournier D., Jackson W., Amer N. M. Sensitive photothermaldeflection technique for measuring absorption in optically thin media // *Optics Letters*. – 1980. – Vol. 5, № 9. – P. 377-379.
3. Гультиков Н.В. Фототепловая спектроскопия для измерения поглощения в органических полупроводниках – 2017.

ПЕЧАТНЫЕ ПЕРОВСКИТНЫЕ ПОЛУСФЕРИЧЕСКИЕ МИКРОЛАЗЕРЫ

Смирнов А.А.,¹ Полушкин А.С.,² Погосян Т.Н.,¹ Макаров С.В.,² Виноградов А.В.¹

¹НИЦ ИТМО, Международный научный центр SCAMT, Санкт-Петербург, Россия

²НИУ ИТМО, МНИЦ нанофотоники и метаматериалов, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a_smirnov@scamt-itmo.ru

Микролазеры на основе метал-галлоидных перовскитов в последние годы являются объектом интенсивного изучения [1]. В отличие от классических полупроводниковых материалов, ионная природа перовскитов дает возможность получать оптически-активные структуры растворными методами [2], к числу которых относится струйная печать. Наносимые струйной печатью микрообъекты обладают гладкой поверхностью и четко выраженной полусферической геометрией, что предпочтительно для резонанса мод шепчущей галереи [3]. Таким образом, задачей исследования является получение перовскитных полусферических микролазеров методом струйной печати и их изучение.

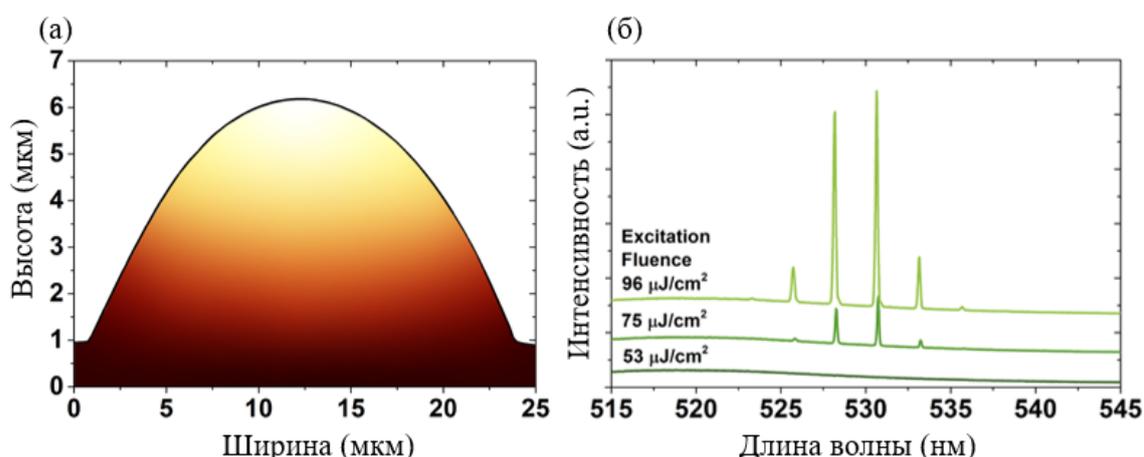


Рис. 1. А Профиль микролазера; Б Спектр излучения микролазера при разной мощности накачки.

Исследуемые массивы микролазеров были получены струйной печатью жидких чернил на гидрофобной подложке из полидиметилсилоксана, нанесенного на стекло. В основе чернил лежит диметилсульфоксид, содержащий соли-прекурсоры метал-галогенидных перовскитов состава CsPbBr₃ и полимерный компонент в виде поливинилпирролидона. Полученные полусферические микрорезонаторы (рис. 1а) содержат кристаллическую перовскитную фазу, заключенную в полимерную матрицу. При накачке фемтосекундным лазером с длиной волны 405 нм, структуры показывают наличие мод шепчущей галереи (рис. 1б) со средним порогом накачки 44,8 мДж/см². Добротность полученных резонаторов для лазерующих мод достигает 3300.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-10202)

Литература

1. Wang K. et al. Recent advances in perovskite micro- and nanolasers //Advanced Optical Materials. – 2018. – Т. 6. – №. 18. – С. 1800278.
2. Xing G. et al. Low-temperature solution-processed wavelength-tunable perovskites for lasing //Nature materials. – 2014. – Т. 13. – №. 5. – С. 476-480.
3. Zhao J. et al. Full-color laser displays based on organic printed microlaser arrays //Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 870.

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДИОДНОЙ МАТРИЦЫ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ТРУБОК

Соколова А.А.

*С-Пб. ПУ Петра Великого, Институт электроники и телекоммуникаций,
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: nanasokol@list.ru*

В настоящее время устройства, использующие кремниевые мишени, все еще востребованы как с военной технике, так и для регистрации инфракрасного излучения [1, 2].

Повышение характеристик приборов может быть достигнуто путем внедрения новых технологий и материалов в процесс их производства [2]. Одной из важнейших задач, которую решают для улучшения характеристик этих приборов, связана с получением высокой фоточувствительности массива в ближнем ИК диапазоне при низком уровне шума. Данное условие может реализоваться разными способами, такими как увеличение количества диодов в сетке, а также улучшение качества процессов обработки. Во избежание появления брака и ухудшения параметров пластин необходима эф-

фективная методика контроля качества. Разработка этой методики и экспериментальной установки для её реализации является целью данной работы.

Процесс изготовления кремниевой пластины очень сложный и долгий. Его можно разбить на четыре основных цикла: окисление, фотолитография, химическое округление и контроль. Наша работа относится к контролю. На рис. 1а представлен внешний вид кремниевой пластины готовой к установке в прибор.



Рис. 1. а - Внешний вид готовой кремниевой пластины, б – Внешний вид пластины для контроля перед химическим округлением

Было установлено, что вероятность дефектов (только механические), которые могут возникнуть при покрытии пластины лаком, составляет порядка 0,01 %, при химическом округлении порядка 0,05 %. Это в условиях производства несущественно. На рис. 1б для примера представлена пластина перед контролем.

Установим, что при контроле пластин необходимо различать центральную и краевую зоны. Краевая зона составляет не более 3 мм от края. Основные дефекты необходимо установить в центральной зоне. Основные виды брака делятся на отсутствие диодов или диодной сетки, дефекты травления, дефекты осаждения поликремнием и механические. Кроме этого, необходимо обеспечить контроль значений спектральной чувствительности и квантового выхода. На рис. 2 представлена структурная схема разработанного нами экспериментального стенда для реализации предложенной методики.

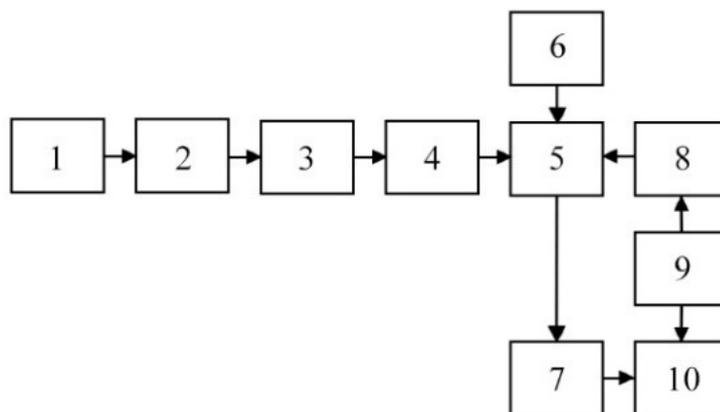


Рис. 2. Структурная схема стенда измерения фоточувствительных параметров: 1 – Блок питания и измерения режима источника излучения, 2 – Источник излучения, 3 – Ослабитель излучения, 4 – Отражающее стекло, 5 – Камера для фоточувствительного прибора с выводами, 6 – Система подачи напряжения на элементы прибора, 7 – Цифровой мультиметр, 8 – микроскоп, 9 – фотокамера, 10 – персональный компьютер

Для примера на рис. 3 представлена спектральная чувствительность (в мА/Вт) массива фотодиодов изготовленных опытных образцов пластинок № 1 и № 2. Для пластины № 2 приведены характеристики при различных значениях ускоряющего напряжения $U_{см}$.

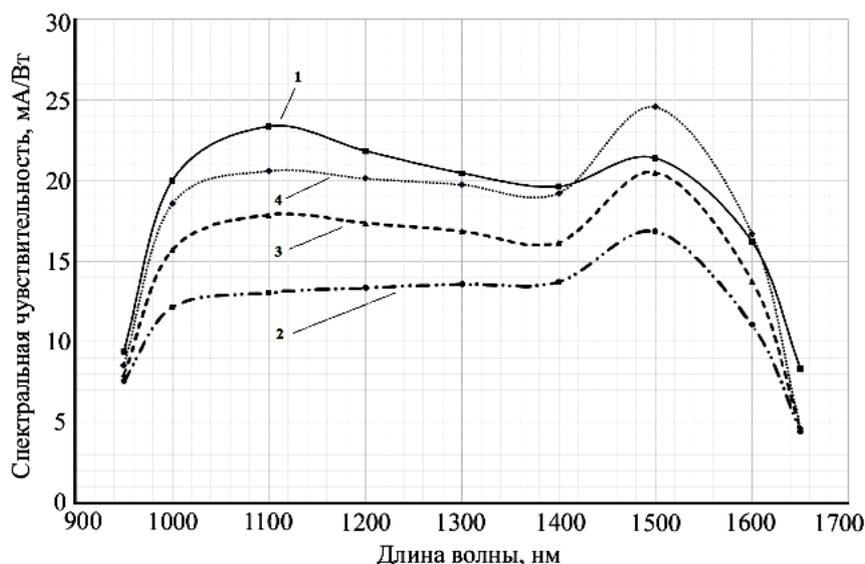


Рис. 3. Спектральные зависимости чувствительности фотодиодов для разных значений напряжения смещения. Графикам 1, 2, 3 и 4 соответствуют следующие пластины и напряжения смещения: 1 – №1 ($U_{см}=3,6В$); 2 – №2 ($U_{см}=2,4В$); 3 – №2 ($U_{см}=2,6В$); 4 – №2 ($U_{см}=2,8В$)

В полученные результаты на рис. 3 подтверждают характеристики, которые определены требованиями к параметрам кремниевых пластин с массивом фотодиодов.

Проведенные исследования и полученные данные показали обоснованность использования разработанной нами методики для контроля качества диодной сетки кремниевых пластин. Разработанный экспериментальный стенд позволяет проводить исследования параметров изготовленных пластин, изготовленных при различных режимах технологического цикла. Это позволит решать различные задачи, как по улучшению фоточувствительных параметров пластины, так для снижения брака при их производстве.

Литература

- [1] Айнбунд, М.Р. Кремниевая электронно-чувствительная рp-линейка, облучаемая с обратной стороны / М.Р. Айнбунд, Д.Е. Миронов, А.В. Пашук, В.И. Зубков, А.В. Соломонов, В.В. Забродский, А.В. Николаев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22. – № 5. – С. 80 – 92.
- [2] Константинов, П.Б. Электронный формирователь сигнала изображения для электронно-оптических преобразователей 5-ого поколения / П.Б. Константинов, Е.В. Костюков, В.В. Чернокожин // Электронная техника, серия 2, Полупроводниковые приборы. — 2009. — Т. 223. – № 2. — С. 62 – 68.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ ЛЕТУЧИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СРЕД И ИХ СМЕСЕЙ В ВИДИМОМ СВЕТЕ

Степаненков Г.В., Вакорина Д.В., Резников Б.К.

*С-Пб. ГУ телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург,
Россия*

E-mail: 261199g@gmail.com

Введение

Сокращение в мире энергетических ресурсов, а также высокие цены привели к необходимости бережного их использования. Одним из приоритетных направлений в области их рационального использования являются разработки быстрых и надежных методы экспресс – контроля состояния конденсированных сред. В последние годы к при-

борам и методам экспресс-контроля стали предъявлять ряд достаточно жестких требований. Основное из них связано с тем, чтобы измерения различных параметров среды не вносили в неё необратимых изменений. Почти для всех жидких сред — это необходимо для получения подтверждения результатов экспресс-контроля на приборах высокого разрешения в специальной лаборатории. Кроме того, используемые в экспресс-контроле методы должны быть применимы для исследования большого числа сред. Погрешность измерения параметров должна быть не более 1,5 %. Данным требованиям в настоящее время удовлетворяют только два метода: ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и рефракция [1, 2]. Рефрактометры обладают неоспоримым преимуществом перед малогабаритными ЯМР спектрометрами и релаксометрами по размеру, массе и стоимости [1-3]. Поэтому этим приборам отдают предпочтение при проведении экспресс-контроля состояния различных конденсированных сред.

Методика измерения и конструкция рефрактометра

В мерный объем 10 мл помещается исследуемая проба с летучими углеводородами. Среда в этом объеме встряхивается и перемешивается. Рассмотрим самый сложный вариант, мы не знаем среду или смесь, кроме того, что они относятся к углеводородным.

Для границы свет-тень, по которой будем измерять показатель преломления n_m , будем использовать дневной свет (например, излучение Солнца). В его спектре присутствует желтая линия Na ($\lambda = 589,3$ нм), на которой проводятся измерения показателей преломления конденсированных сред для сравнения со стандартными, выполненными в лабораториях. Для этого необходимо, чтобы свет поступал только на грань одной из призм. На вторую призму свет поступать не должен. В итоге на выходе из призмы 1 (нижняя призма) формируется граница свет-тень и измеряется n_b . Далее поступление света на призму 1 перекрывается и свет поступает на призму 2 (верхняя призма) и измеряется n_t . Температура T исследуемой среды постоянно контролируется. При проведении наших измерений n_t и n_b необходимо все реализовать очень быстро (за 6-8 секунд), чтобы не произошли существенные перемещения между средами в измеряемых слоях. В предложенном нами герметичном объеме испарения летучих углеводородных сред за такое время не произойдут. Температура так быстро не изменяется. Для определения концентраций сред в смеси используем уравнение рефракции:

$$n_m = K_1 n_1 + K_2 n_2 + \dots + K_n n_n \quad (1)$$

где n_m – измеренный в начальный момент показатель преломления среды ($n_m = n_t = n_b$), n_1, n_2, \dots, n_n – значения показателей преломления сред, из которых может состоять исследуемая смесь, K_1, K_2, \dots, K_n – коэффициенты, которые характеризуют относительное содержание различных сред в исследуемой смеси (в случае необходимости определения процентного содержания эти коэффициенты умножают на 100 %). Опыт работы с летучими углеводородными средами и анализ результатов различных исследований показал, что в уравнении (1) необходимо оставить первоначально два члена:

$$n_m = K_1 n_1 + K_2 n_2 \quad (2)$$

С учетом разработанной нами методики измерения и полученных данных уравнение (2) принимает следующий вид:

$$n_m = K_1 n_b + K_2 n_t \quad (3)$$

В уравнение (3) известны три значения показателя преломления n_m и два измеренных значения (n_t и n_b). Значения n_t и n_b измеряются после того, как среда постоит 2-3 минуты, и бензины перераспределятся в смеси (легкий поднимется на верх, тяжелый опустится). В этом случае в соответствии с теоремой Коши уравнение (3) имеет единственное решение относительно коэффициентов K_1 и K_2 . Если смесь состоит только из двух сред значение коэффициентов K_1 и K_2 получаются однозначно.

Для практической реализации разработанной нами методики была собрана конструкция рефрактометра. В конструкции была реализована возможность размещения жидкой среды в герметичном объеме, который располагается между двумя призмами. Также был реализован контроль поступления видимого света на две призмы (возможность измерять показатель преломления среды с использованием верхней или нижней призмы). На рис. 1 (а, б) представлены структурная схема рефрактометра и ход оптических лучей для двух случаев измерения: (а) – n_t , (б) – n_b .

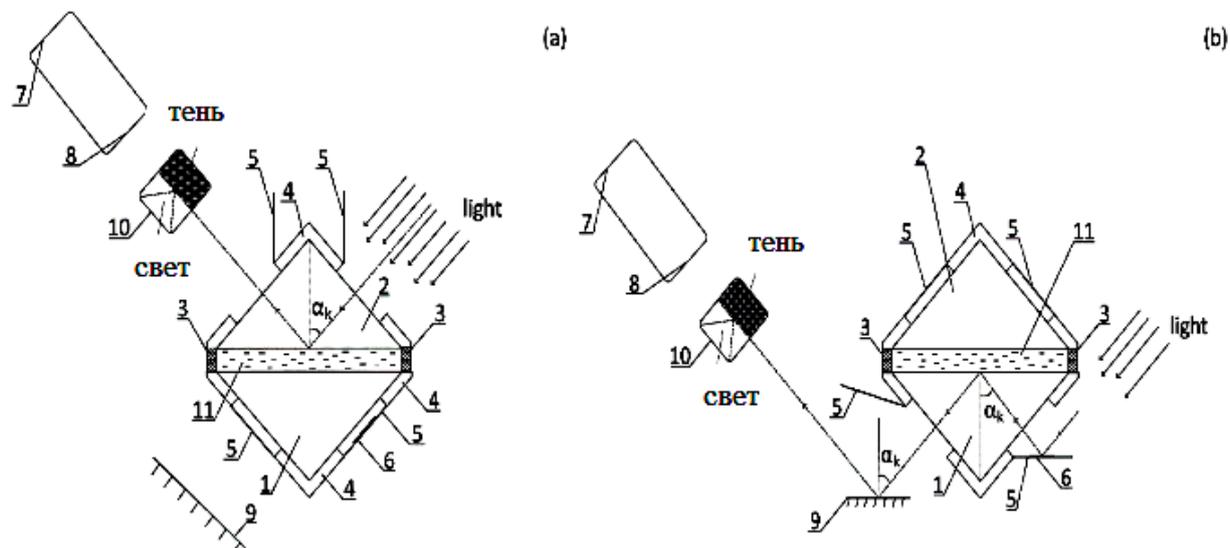


Рис. 1. Структурная схема оптической части рефрактометра и ход лучей для верхней (а) и нижней (б) призмы: 1 – нижняя треугольная призма (материал лейкосапфир), 2 – верхняя треугольная призма (материал лейкосапфир), 3 – силиконовые прокладки, 4 – поворотное крепление призм, 5 – закрывающая заслонка, 6 – зеркало, 7 – окуляр, 8 – линза на подвижном креплении, 9 – зеркало, 10 – пластина для регистрации границы свет-тень, 11 – исследуемая среда

Заключение

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал адекватность разработанной нами методики для определения при экспресс-контроле состояния углеводородных сред, а также состава двухкомпонентных смесей и соответствующие концентрации. Разработанная конструкция малогабаритного рефрактометра с учетом установленных особенностей позволяет проводить измерения значений n_m в видимом свете с погрешностью $\pm 0,0004$. Данное значение удовлетворяет требованиям экспресс-контроля.

Литература

1. Rodriguez, E. V. Application of the generalized linear model to enable refractive index measurement with thermal sensitive interferometric sensors. / E. V. Rodriguez, A. D. Guzman Chavez // *Optics Communications*. – 2022. – V. 524. – P. 128765.
2. Calhoun, W. R. Measurement of the refractive index of highly turbid media / H. Maeta, A. Combs, L. M. Bali, S. Bali // *Opt. Lett.* – 2010. – V. 35(8). – P. 1224–1226.
3. Karabegov, M. A. A method of increasing the accuracy of analytical instruments by structural correction / M. A. Karabegov // *Measurement Techniques*. – 2009. – V. 52(10). – P. 1126–1133.

Степанов М.А., Гуськов А.А.

МИРЭА — Российский технологический университет, Россия
stepanov_m@mirea.ru

В работе представлено влияние параметров периодических плазмонных полосковых структур на поляризационную восприимчивость фототранзистора на базе монослойной пленки графеноподобного полупроводника MoS_2 .

Графеноподобные двумерные структуры являются перспективными материалами для наноэлектроники благодаря своим физическим свойствам [1]. Самые перспективные материалы такого класса – это дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). На основе подобных материалов с каждым годом создается все больше различных устройств фотоники [2, 3]. Недостатком графеноподобных материалов является их малое оптическое поглощение [4], что может быть компенсировано созданием упорядоченных металлических плазмонных структур на поверхности пленки полупроводника.

Помимо этого, подобные плазмонные структуры могут обладать высокой чувствительностью (селективностью) к оптической поляризации. Так в ряде работ недавно были продемонстрированы поляризационно чувствительные датчики на основе ДПМ и плазмонных упорядоченных структур [5, 6].

В данной работе нами приведены экспериментальные результаты исследования поляризационной селективности периодической плазмонной структуры из нанополосок золота Au на двумерном полупроводнике MoS_2 . Пленка ДПМ была создана методом химического осаждения из газовой фазы, а плазмонные структуры методом электронно-лучевой литографии. Процент заполнения полупроводникового канала фототранзистора полосковыми наноструктурами из золота Au варьировался от 20 до 50 %. Период плазмонных структур ровнялся 200 и 800 нм.

На рисунке 1 представлены экспериментальные результаты исследования поляризационной чувствительности (отношения фототоков, индуцированных двумя ортогональными поляризациями света) плазмонных структур с периодом равным 200 нм.

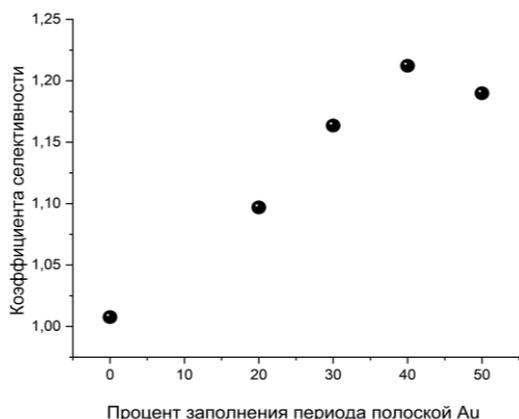


Рис.1. Зависимость коэффициента селективности от процента заполнения золотом

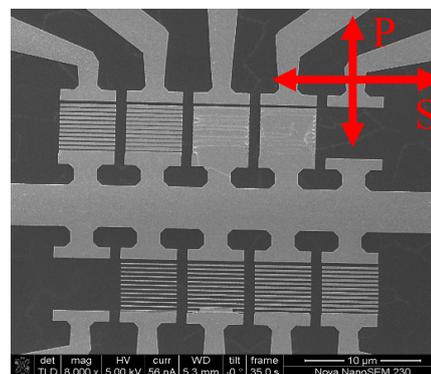


Рис.2. ЭМ фотография структуры с отмеченными направлениями поляризации света

Из полученных результатов можно сделать вывод, что поляризационную селективность пленки ДПМ можно увеличить более чем на 20 процентов, варьируя параметры периодической плазмонной структуры.

Работа выполнена при поддержке РТУ МИРЭА (грант "Для молодых ученых" НИЧ-55 «Поляризационно-чувствительные оптические детекторы на основе двумерных полупроводников»).

Литература

1. Novoselov K. S. et al. 2D materials and van der Waals heterostructures //Science. – 2016. – Т. 353. – №. 6298. – С. aac9439.
2. Lan H. Y. et al. Gate-tunable plasmon-enhanced photodetection in a monolayer MoS₂ photo-transistor with ultrahigh photoresponsivity //Nano Letters. – 2021. – Т. 21. – №. 7. – С. 3083-3091.
3. Hong S. et al. Highly sensitive active pixel image sensor array driven by large-area bilayer MoS₂ transistor circuitry //Nature communications. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 1-11.
4. Piper J. R., Fan S. Broadband absorption enhancement in solar cells with an atomically thin active layer //Acs Photonics. – 2016. – Т. 3. – №. 4. – С. 571-577.
5. Guskov A., Lavrov S., Galiev R. Polarization Sensitive Photodetectors Based on Two-Dimensional WSe₂ //Nanomaterials. – 2022. – Т. 12. – №. 11. – С. 1854.
6. Guskov A. et al. Sensitivity enhancement of two-dimensional WSe₂-based photodetectors by ordered Ag plasmonic nanostructures //Applied Physics Express. – 2021. – Т. 14. – №. 7. – С. 075005.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ЛАЗЕРНАЯ КЕРАМИКА. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Тараканов Е.Д., Ульянов Я.В.

Государственный лазерный полигон «Радуга», Москва, Россия

E-mail: egortarakanoff@yandex.ru

Активным элементом в современных твердотельных лазерных системах в основном выступает монокристалл. Как показывает опыт мирового сообщества, монокристалл уже потерял свою популярность и отошел на второй план, а ему на смену пришла лазерная керамика, которая позволяет значительно улучшить показатели лазерных систем, причём при тех же массогабаритных параметрах. Так же на ее основе возникает возможность для создания совершенно новых лазерных систем, которые невозможно будет реализовать на монокристаллах.

Технологический процесс производства лазерной керамики предлагает гибкое конструирование на макро, микро- и молекулярном уровне. Есть ряд различных возможностей для формирования высокомошных лазеров, чьё производство невозможно на базе обычных монокристаллов, например, композитные структуры, а также увеличение атомной концентрации легирующего элемента (редкоземельные элементы лантаноидной группы), улучшающее генерационные характеристики выходного излучения активного элемента лазера. Оптические свойства активных элементов лазерной керамики ничем не уступают аналогичными им свойствам у монокристаллов.[1] В качестве преимущества лазерных систем на основе керамики является ее низкая себестоимость изготовления активных элементов в отличие от монокристаллов.

При участии ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН на ФКП «ГЛП «Радуга» была разработана и введена в эксплуатацию технологическая линия по производству высокопрозрачной лазерной керамики, в том числе композитной. [2][3] Производство материалов содержит следующие технологические операции: синтез исходных порошков, придание исходному порошку требуемых формы и размеров, спекание или термическая обработка под давлением, механическая обработка заготовки для формирования оптической детали, нанесение защитных и просветляющих покрытий, контроль качества готового изделия.

Литература

1. A. Ikesue, Yan Lin Aung, Synthesis and Performance of Advanced Ceramic Lasers, Journal of the American Ceramic Society, 89(6), 136-1944, (2006).
2. V.V. Bezotosnyi, V.V. Balashov, V.D. Bulaev, A.A. Kaminskii, A.Y. Kanaev, V.B. Kravchenko, A.V. Kiselev, YuL. Kopylov, A.L. Koromyslov, O.N. Krokhin, K.V. Lopukhin, S.L. Lysenko, M.A. Pankov, K.A. Polevov, Y.M. Popov, E.A. Cheshev, I.M. Tupitsyn,

Lasing characteristic of new Russian laser ceramics, *Quantum Electron.* 48(9), 802–806, (2018).

3. V.V. Bezotosnyi, E.A. Cheshev, V.P. Gordeev, Y.L. Kopylov, A.L. Koromyslov, K.V. Lopukhin, K.A. Polevov, I.M. Tupitsyn, V.V. Balashov, A.Y. Kanaev, *Composite Ceramic Nd³⁺:YAG/Cr⁴⁺:YAG Laser Elements*, *Journal of Russian Laser Research*, 40(3), 237-242, (2019).

ШИРОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФЕРРИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ КАК КВАДРАТИЧНАЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ СРЕДА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Ткаченко Т.П.^{1,3}, Кузнецов А.В.^{1,3} Жукович-Гордеева А.А.^{2,3}

ФИ им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: tptkachenko@lebedev.ru

Полярные жидкокристаллические мезофазы вызывают большой интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения [1]. Ферриэлектрические жидкие кристаллы (ФЖК) включают в себя разнообразные полярные мезофазы, общим недостатком которых являлся узкий температурный диапазон их существования (в пределах 10 °С), и при высоких температурах $T > 60^\circ\text{C}$. В работе представлен разработанный авторами в 2022 году первый в мире ФЖК с диапазоном мезофазы от -3°C до $+47^\circ\text{C}$. Этот ФЖК, названный FerriLCM-1 [2], обладает геликоидальной закруткой с субволновым шагом $p_0 \cong 110$ нм (рис. 1а), что позволяет рассматривать его оптические свойства в рамках классической кристаллооптики [1].

Электрооптический отклик в ФЖК FerriLCM-1 возникает благодаря эффекту деформации геликоида (Deformed Helix Ferroelectric, DHF [1, 2]) в электрическом поле, что обеспечивает времена отклика τ от десятков до сотен микросекунд в широком температурном интервале, причём в электрических полях менее 0,5 В/мкм [2] (рис. 1а).

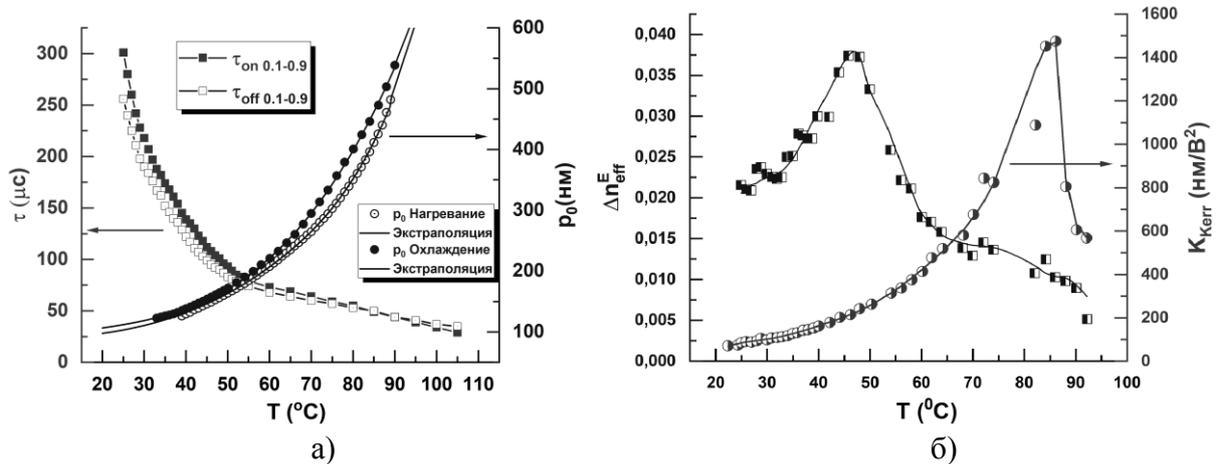


Рис. 1. Температурные характеристики FerriLCM-1: а) Зависимости шага спирали и времен электрооптического отклика от температуры; б) Зависимость коэффициента Керра и электроуправляемого двулучепреломления от температуры.

ФЖК FerriLCM-1 является в настоящее время самой низковольтной квадратичной жидкокристаллической электрооптической средой, коэффициент Керра (K_{Kerr}) которой достигает 1500 нм/V² (рис. 1б), что почти в миллион раз больше коэффициента Керра нитробензола. При этом максимальный диапазон изменения электроуправляемого двулучепреломления Δn_{eff}^E составляет 0,037 (рис. 1б), что не достигается в жидкостях.

Сказанное выше означает, что разработанный авторами ФЖК перспективен для создания электрооптических модуляторов с управляющим напряжением менее одного вольта (не существующих в настоящее время), а также для создания низковольтных световых фазовых матриц в оптических пинцетах и лидарах.

Авторы благодарны д.ф.-м.н., профессору Пожидаеву Е.П. за руководство данной работой.

Литература

Pozhidaev E., et al. Electro-optics of ferroelectric and antiferroelectric liquid crystal helical nanostructures // *J. of Mol. Liq.* 2022. V. 367. 120493.

Pozhidaev E., et al. Broad temperature range ferroelectric liquid crystal as a highly sensitive quadratic electro-optical material // *Opt. Lett.* 2022. V. 47 (7). P. 1598-1601.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИП-ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Ульянов Я.В., Чешев Е.А.

НИЯУ «МИФИ», инженерно-физический институт биомедицины, Москва, Россия

E-mail: anti-peace@yandex.ru

Разработка и создание миниатюрных оптических схем лазеров одно из актуальных направлений в этой области. Важным направлением миниатюризации лазеров является разработка малогабаритных резонаторов (микрорезонаторов). В связи с усовершенствованием керамической технологии, появилась возможность создавать оптические среды разных форм и размеров, а также с различной комбинацией слоев по составу, и сочетать в себе активную среду, и элемент пассивного затвора, и резонатор [1]. Осталось лишь понять соответствуют ли такие керамические оптические элементы по генерационным характеристикам кристаллическим оптическим элементам.

Целью этой экспериментальной работы являлось исследование характеристик чип-элементов на основе отечественной композитной керамики $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ для компактных импульсных лазеров с диодной накачкой.

В этой работе были решены следующие задачи:

- сборка экспериментального стенда;
- оптимизация оптической схемы микро-чип лазера;
- измерение генерационных характеристик лазеров $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ на основе композитной керамики;
- обработка и анализ полученных результатов измерений.

Полученные композитные компакты прокаливались при 900°C в течение 5 часов для удаления остаточных органических веществ и спекались при 1830°C в течение 35 часов в вакуумной печи с вольфрамовым нагревателем при 10^{-4} Па для получения полностью плотной керамики. После чего спеченные образцы отжигали при 1400°C в течение 30 часов на воздухе для удаления кислородных вакансий и превращения Cr^{3+} в Cr^{4+} . Определяющий размер образца (толщина для диска и диаметр для стержня), полученного по данным методам ограничен 7-8 мм. Таким образом, были полученные образцы диаметром 6 мм и толщиной 9 мм и диаметром 20 мм и толщиной 8,5 мм.

Образец размером $d20*9$ был разрезан на 9 элементов. После обработки и полировки торцов элементов были получены следующие образцы: $d3*7$ – 4 штуки, $d4*7$ – 5 штук, $d8*9$ – 1 штука. Торцы всех образцов были плоскопараллельно отполированы с точностью $\lambda/8$, которые были отшлифованы и отполированы с каждой стороны с использованием алмазных суспензий. На торцы элементов были нанесены следующие покрытия: со стороны $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ глухое покрытие на длине волны генерации 1064 нм

и прозрачное покрытие для длины волны накачки 808 нм, со стороны Cr⁴⁺:YAG были нанесены выходные зеркала, имеющие коэффициент отражения близкий к оптимальным в соответствии с начальным пропусканием насыщающегося поглотителя Cr⁴⁺:YAG.

Для исследования профиля химического состава в районе границы частей композита, было измерено пропускание в направлении параллельном границе. Измерения проводились на длине волны 808 нм (переход 4I9/2 → 4F5/2, 2H9/2 ионов Nd³⁺) и длине волны 613 нм (переход 3B1 (3A2) → 3E (3T1) + [v] ионов Cr⁴⁺). Измеренное пропускание обратно пропорционально концентрации ионов.

Схема лабораторного стенда, используемого для измерения генерационных характеристик приведена на рисунке 1.

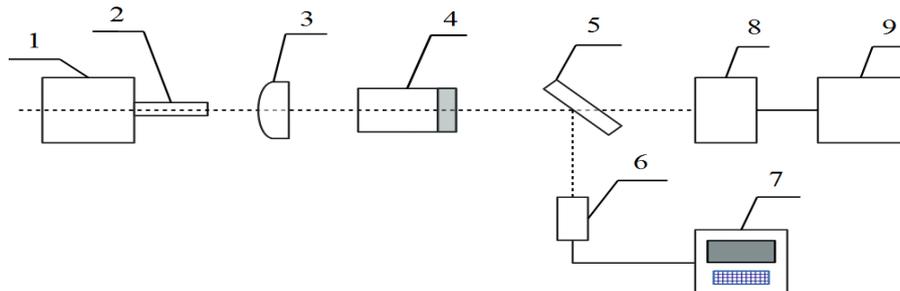


Рис. 1. Принципиальная схема стенда. 1,2 – лазерный диод с волоконным выходом или без него, 3 – фокусирующая оптика, 4 – микрочип резонатор, 5 – дихроичное зеркало 50-процентное, 6 – фотоприемник, 7 – осциллограф, 8,9 – измеритель мощности с цифровым табло

Лазерный диод (ЛД) является системой накачки. Из лазерного диода (ЛД) пошла накачка, сфокусировалась в элемент фокусирующей оптикой (линзой или двумя линзами, которые определяют радиус пучка накачки W_p). Накачка попадает на активный элемент, в активном элементе возбуждается генерация. Там стоит затвор. Затем излучение пошло на систему регистрации через дихроичное зеркало, излучающее в 50 процентном отношении, которое параллельно разводит для конкретной длины волны на две регистрирующие системы: одна измеряет мощность, другая измеряет профиль импульса.

Для исследования генерационных характеристик микрочип лазеров использовались два различных источника накачки. В первом случае был использован одиночный диод FocusLight на длину волны 808 нм, мощностью до 10 Вт. Излучение диода фокусировалось с помощью цилиндрической и плоскосферической линзы в пятно размером 116 мкм на 96 мкм на глубине 1 мм от торца композитного элемента. Накачка осуществлялась в квазинепрерывном режиме QCW со скважностью $d=10$ ($F=200$ Гц) с длительностью импульса накачки $\tau_{pulse}=250$ мкс. Образцы, вырезанные из C2 демонстрируют одинаковые характеристики, это свидетельствует об однородности образцов, получаемых в таком технологическом процессе.

Во втором эксперименте в качестве накачки использовался лазерный модуль BWT с волоконным выходом 105 мкм и $NA=0,22$ излучение которого фокусировалось с помощью плоскосферической линзы на торец элемента. Модуляция накачки осуществлялась с помощью вращающегося диска со щелями, обеспечивающим скважность 1 к 85 обеспечивая длительность импульса накачки $\tau_{pulse}=400$ мкс с периодом повторения 34,62 мс ($f=28,88$ Гц).

Исследованы генерационные характеристики двух образцов микро-чип лазеров на основе композитной керамики Nd³⁺:YAG/Cr⁴⁺:YAG и одного кристаллического образца, изготовленного методом диффузионной сварки. Показано, что генерационные характеристики керамических незначительно уступают кристаллическому. Вероятно, это обусловлено спецификой работы керамических затворов Cr⁴⁺:YAG.

Проведённые исследование свидетельствует о том, что относительная эффективность исследуемых керамических образцов микрочип лазеров сравнима с кристалличе-

скими, и задача создания таких микрорезонаторов будет сведена к выбору оптимального дизайна.

Литература

В.В. Безотосный, В.В. Балашов, В.Д. Булаев, А.А. Каминский, А.Ю. Канаев, В.Б. Кравченко, А.В. Киселев, Ю.Л. Копылов, А.Л. Коромыслов, О.Н. Крохин, К.В. Лопухин, С.Л. Лысенко, М.А. Панков, К.А. Полезов, Ю.М. Попов, Е.А. Чешев, И.М. Тупицын, “Генерационные характеристики новых лазерных керамик отечественного производства”, *Квантовая электроника*, 48:9 (2018), 802–806.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПРОФИЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ЗУБЧАТЫМИ АПОЗИДИРУЮЩИМИ ДИАФРАГМАМИ

Устинов И.М.^{1,2}, Зималин Б.Г.¹, Мурылев В.В.¹

¹ РФЯЦ-ВНИИЭФ, Институт лазерно-физических исследований, г. Саров, Россия

² Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Саров

e-mail: oeftimova@otd13.vniief.ru

Проведены расчетные исследования формирования пространственного профиля интенсивности лазерных пучков с применением зубчатых аподизирующих диафрагм [1]. Рассмотрено формирование пучков диафрагмами квадратной и прямоугольной формы с различными типами зубчатой структуры. Показана возможность формирования аподизированных пучков с коэффициентом заполнения до 87% и отношением пиковой плотности энергии к средней $\leq 1\%$. Исследовано сохранение пространственной структуры сформированных пучков при их распространении от плоскости перестроения изображения зубчатой диафрагмы. Показана возможность применения зубчатых диафрагм прямоугольной формы в системе апертурного деления лазерного пучка с перспективой реализации в лазерных установках пикосекундной длительности импульсов [2].

Список литературы:

1. J.M. Auerbach, V.M. Karpenko. Serrated-aperture apodizers for high-energy laser systems. *Applied Optics*, v.33, No.15, pp.3179-3183 (1994).
2. Di Nicola J.M., Yang S.T., Boley C.D. [et al]. “The Commissioning of the Advanced Radiographic Capability Laser System: Experimental and Modeling Results at the Main Laser Output”. *High Power Lasers for Fusion Research III*, edited by Abdul A. S. Awwal, Monya A. Lane, Proc. of SPIE Vol. 9345, 93450I · © 2015 SPIE.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ ВОДНЫХ СРЕД С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Утегенова Л.С., Сарманова О.Е.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: utegenova.ls20@physics.msu.ru

В настоящее время проблема контроля концентрации ионов тяжелых металлов в жидких природных средах является актуальной задачей в области экологии [1]. В данной работе решение задачи определения концентрации ионов тяжелых металлов в водных средах реализовано с использованием искусственных нейронных сетей [2], а именно, многослойных перцептронов с одним скрытым слоем.

Аппаратура для регистрации спектроскопических данных, а также сами процессы ее регистрации содержат многочисленные источники variability, которые проявляются в виде изменений в полученных данных, которые не связаны с изменением состава или свойств рассматриваемых образцов. Эти отклонения могут быть вызваны механическими изменениями, шумами в системе регистрации (внутренняя изменчивость мощности лазера, изменения в оптической фокусировке), наконец, просто окружающим тепловым шумом или изменением влажности. Для повышения качества решения обратной задачи и нивелирования влияния указанных негативных шумовых эффектов различные этапы предварительной обработки могут быть применены непосредственно к данным перед дальнейшим анализом.

Влияние процедур предобработки данных исследовано на базе спектров комбинационного рассеяния (КР) света растворами неорганических солей $Zn(NO_3)_2$, $ZnSO_4$, $Cu(NO_3)_2$, $CuSO_4$, $LiNO_3$, $Fe(NO_3)_3$, $NiSO_4$, $Ni(NO_3)_2$, $(NH_4)_2SO_4$, $NH_4(NO_3)$ в различных водах. Так, в базе содержится 3744 уникальных примера с ненулевой концентрацией солей в дистиллированной воде и 400 растворов солей в воде из Москва-реки. Концентрация катионов варьируется в диапазоне от 0 до 1 М.

В работе изучается влияние различных методов предобработки входных данных для рассматриваемой обратной задачи оптической спектроскопии. Использовались следующие статистические методы нормировки данных: по энергии лазерного излучения, по минимальному/максимальному значению интенсивности КР, Z – преобразование. Кроме того, в работе рассмотрены различные методы предобработки данных, основанные на физических принципах: вычитание флуоресцентного пьедестала, корректировка на оптическое поглощение растворов, корректировка на площадь валентной полосы в спектрах КР, а также их различные комбинации. Таким образом, для каждого способа предобработки данных была решена задача предсказания концентрации ионов неорганических солей в водных растворах по спектрам КР с помощью перцептронов с одним скрытым слоем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-11-00333, <https://rscf.ru/project/19-11-00333/>.

Литература

1. P.V. Tchounwou, C.G. Yedjou, A.K. Patlolla, and D.J. Sutton, 2012, “Heavy metal toxicity and the environment”, Molecular, clinical and environmental toxicology, Springer, Basel, 133-164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
2. Simon Haykin // NEURAL NETWORKS: A Comprehensive Foundation. Second Edition // Prentice Hall, Inc., 1999

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ОБРАЗЦОВ НАТУРАЛЬНЫХ ЗУБОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В УФ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Фадеев И.С. и Брандт Н.Н.

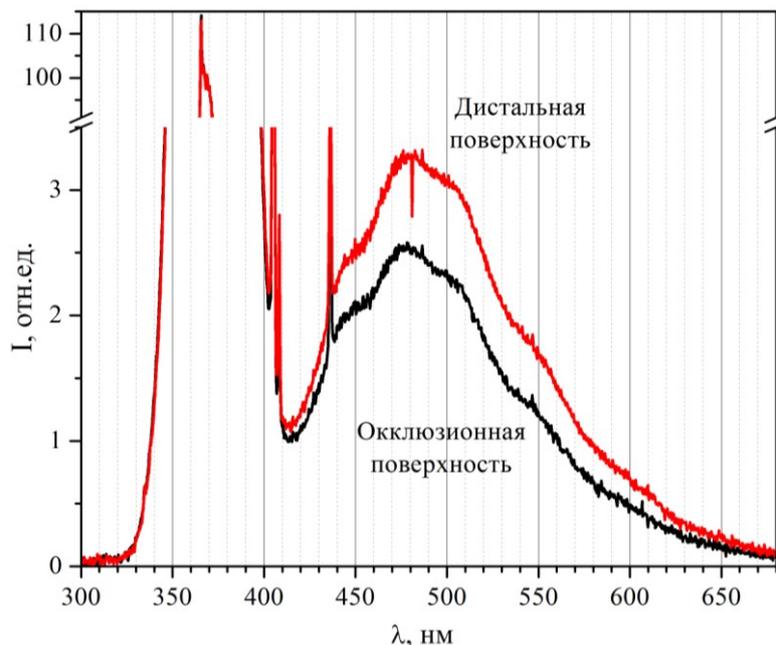
МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: fadeev.is20@physics.msu.ru

Для человека часто важным является вопрос его внешнего вида. Даже в наши дни, когда хорошо развита медицина и косметология, встречаются задачи, требующие отдельного рассмотрения. В частности, возникает вопрос, может ли зубной протез полностью заменить естественный зуб? В стоматологическом протезировании в этом отношении существует ряд нерешённых задач. Одна из них состоит в имитации естественной флуоресценции зуба.

Для имитации естественной флуоресценции зубной протез из диоксида циркония обычно покрывают специальными красителями и глазуриями [1]. Наиболее часто ис-

пользуются три флуоресцентных материала: полимер Lava Ultimate с керамическим нанонаполнителем, тетрагональный диоксид циркония Lava Plus и диоксид циркония Lava Esthetic. Флуоресценция Lava Ultimate характеризуется двумя линиями с максимумами на длинах волн 482 и 435 нм. Два других материала имеют одну флуоресцентную линию с максимумом на длине волны 435 нм. Наибольшей интенсивностью флуоресценции обладает материал Lava Esthetic [2]. Однако при обжиге и старении керамических протезов они начинают терять свои флуоресцентные свойства, что является их существенным недостатком.



Спектры флуоресценции зуба-моляра взрослого донора в окклюзионной (торцевой) и дистальной (боковой) областях при возбуждении УФ лампой DORS 115.

С другой стороны, подбор материалов для покрытия зуба предполагает возможность количественного сравнения их флуоресцентных характеристик. Для этого необходима разработка методики получения воспроизводимых спектров флуоресценции натуральных зубов и зубных протезов.

В работе предлагается экспериментальная установка и методика обработки спектров флуоресценции зубов, позволяющая проводить их количественное сравнение. Измерены спектры натуральных зубов здоровых доноров разных возрастов. Проведено сравнение спектров при возбуждении аналогичных областей разных зубов и различных участков одного и того же зуба (его дистальной и окклюзионной поверхностей). Возбуждение каждой области осуществлялось без фокусировки излучения на поверхность зуба. В канале светосбора элементы, собирающие рассеянный и флуоресцентный свет, также отсутствовали.

В качестве источника УФ возбуждения использована лампа DORS 115 с максимумом на длине волны 366 нм и полушириной линии около 16 нм. Образец фиксировался под лампой, а рассеянный и флуоресцентный свет собирались оптоволоком, присоединённым ко входному порту спектрометра Ocean Insight HR4000. Спектр измерялся в интервале 200-1100 нм с разрешением около 0,7 нм.

На рисунке приведено сравнение двух спектров флуоресценции одного зуба-моляра при возбуждении его боковой (дистальной) и торцевой (окклюзионной) поверхностей. Спектры сдвинуты по вертикальной оси так, чтобы среднее значение сигнала в интервале 200-250 нм было равно нулю. Кроме того, спектры нормированы на интенсивность линии на длине волны около 360 нм, представляющей собой рэлеевское рассеяние возбуждающего излучения на образце. Поскольку интенсивность рэлеевского рассеяния много больше интенсивности флуоресценции и слабо зависит от конкретного образца,

используемая процедура обработки спектров даёт возможность проводить количественное сравнение интенсивности флуоресценции разных образцов. Видно, что интенсивность флуоресценции торца зуба примерно в 1,3 раза больше интенсивности флуоресценции его боковой поверхности.

В работе обсуждаются результаты измерений спектров флуоресценции различных участков зубов разных доноров.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФ № 21-78-10077.

Литература

1. Дьяконенко Е.Е., Вердиян С.А., Сахабиева Д.А., Лебедеико И.Ю. Флуоресценция стоматологических керамических материалов на основе диоксида циркония, *Стоматология* 2021, 100(3), 109-114. Doi: 10.17116/stomat2021100031109.
2. Kauling A, Volpato C, Carvalho O, Pereira M, Güth J., Translucency, contrast ratio and fluorescence of esthetic materials, *Dental materials: official publication of the Academy of Dental Materials* 2018, 34, :e127. Doi: 10.1016/j.dental.2018.08.264.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗ ВОЗБУЖДЁННОГО СОСТОЯНИЯ 5I_7 ИОНОВ ГОЛЬМИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ НА КВАРЦЕВОЙ ОСНОВЕ

Фалэ А.Е.^{1,2}, Камынин В.А.², Федосеев А.И.¹, Филатова С.А.²

¹МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

²ИОФ им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

E-mail: fale.ae18@physics.msu.ru

Оптические волокна, легированные гольмием, в последнее время находят все большее применение в прикладных областях и в научных исследованиях [1]. Обычно они используются для создания лазеров и усилителей в спектральном диапазоне 2-2.2 мкм [2]. Во многих работах экспериментальные данные сопровождаются численным моделированием, которое позволяет понять суть физических процессов в активной среде (см., напр., [3]). Интерес представляет изучение явления резонансного поглощения из возбужденного состояния (ESA) на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_5$, благодаря которому гольмиевые волокна могут использоваться в качестве аттенуаторов или модуляторов в спектральном диапазоне 1.5–1.7 мкм, который частично перекрывает люминесценцию ионов эрбия. Такая модуляция может быть осуществлена путем изменения величины накачки, которая, в свою очередь, влияет на поглощение внешнего резонансного сигнала в гольмиевом волокне. С другой стороны, при достаточно высоких интенсивностях внешнего сигнала может наблюдаться снижение населенности уровня 5I_7 . В этом случае уже внешний сигнал может использоваться как модулятор лазерного излучения.

Целями настоящей работы являются экспериментальное и теоретическое изучение поглощения на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_5$ в гольмиевом волокне в диапазоне длин волн 1.5-1.6 мкм при различных значениях накачки и интенсивности внешнего источника и исследование динамики генерации при модулировании лазерного излучения внешним источником.

В литературе содержится мало информации о переходах ESA, их сечения неизвестны. В представленной работе задача определения сечения поглощения на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_5$ решалась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных. На рис. 1 приведены расчетные кривые, полученные для различных значений сечений, и экспериментальные точки, соответствующие относительной интенсивности внешнего источника, прошедшей всю длину активного волокна, для случая импульсной накачки длительностью ~ 0.1 мс. Для того, чтобы интенсивность внешнего сигнала в различных

точках среды и во времени однозначно определялась значениями населенности уровня 5I_7 , величина мощности источника на входе в среду была выбрана достаточно малой. Видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на одну из этих кривых. Это позволяет оценить величину неизвестного сечения как $1.9 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$.

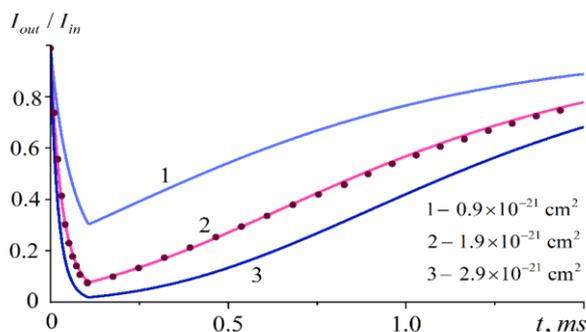


Рис. 1. Относительная интенсивность внешнего сигнала для случая импульсной накачки. Точками показаны экспериментальные данные.

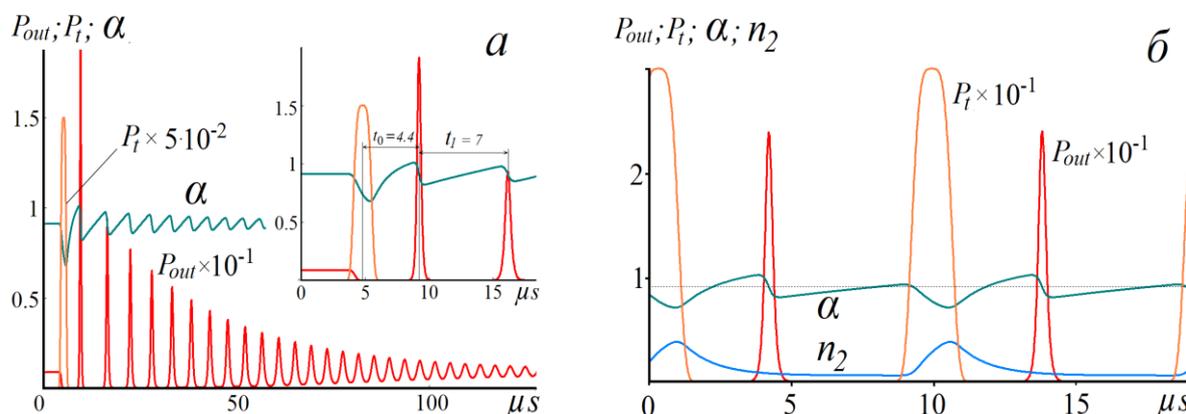


Рис. 2. а) Срыв генерации при воздействии одиночным импульсом на активную среду гольмиевого лазера; б) Работа лазера под действием импульсно-периодического внешнего излучения (P_t – мощность внешнего сигнала, P_{out} – мощность лазерного излучения, α – коэффициент усиления, n_2 – населенность уровня 5I_6)

Найденная величина сечения делает возможным рассмотрение вопроса о модуляции излучения гольмиевого лазера внешним резонансным сигналом. На рис. 2а показан срыв генерации при воздействии на активную среду импульсом амплитудой 30 Вт и длительностью ~ 1.5 мкс. Время восстановления стационарной генерации превышает 150 мкс. Временной интервал t_0 между импульсом от внешнего источника и первым импульсом релаксационных колебаний меньше периода насыщенных релаксационных колебаний t_1 . Рис. 2б иллюстрирует импульсно-периодическую модуляцию лазерного излучения под действием внешнего сигнала. При таком воздействии наблюдается заметное снижение усиления α , что приводит к периодическому затуханию генерации. Импульс от внешнего источника подается в тот момент, когда α близок к потерям, но генерация еще не развилась. Так как время релаксации уровня 5I_5 , на который идет процесс поглощения, мало, то коэффициент усиления определяется скоростью релаксационного перехода с уровня 5I_6 , населенность которого на рисунке обозначена как n_2 . Быстрое восстановление коэффициента усиления с временем t_0 позволяет достигать заметного превышения α над порогом к моменту развития генерации.

Данные рис. 2б показывают, что импульсно-периодический режим, схожий с режимом модуляции добротности, может быть реализован путем резонансного поглощения с возбужденного состояния.

Литература

- [1] Todorov, F., Aubrecht, J., Peterka, P., Schreiber, O., Jasim, A. A., Mrázek, J., ... & Honzátko, P. (2020). "Active optical fibers and components for fiber lasers emitting in the 2- μm spectral range". *Materials*, 13(22), 5177.
- [2] Holmen, L.G., Shardlow, P.C., Barua, P., Sahu, J.K., Simakov, N., Hemming, A., & Clarkson, W.A. (2019). "Tunable holmium-doped fiber laser with multiwatt operation from 2025 nm to 2200 nm". *Optics letters*, 44(17), 4131-4134.
- [3] C. Huang, Y. Tang, S. Wang, R. Zhang, J. Zheng, and J. Xu (2012). "Theoretical Modeling of Ho-Doped Fiber Lasers Pumped by Laser-Diodes Around 1.125 μm ". *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 30, No. 20, 3235-3240

ВЛИЯНИЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ГРАНАТОВ $\text{Gd}_3\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$ ($x = 0, 1, 2, 3$)

Федюнин Ф.Д.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: veter.vett@yandex.ru

Кристаллы гранатов с общей формулой $\text{Gd}_3\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$, легированные ионами Ce^{3+} , являются перспективными сцинтилляционными материалами для применения в медицине, физике высоких энергий и космических исследованиях [1-3]. Данные кристаллы характеризуются высокими значениями плотности и светового выхода [4], а также хорошим энергетическим разрешением [5]. Радиационная стойкость также является одним из наиболее важных параметров для использования гранатов в качестве сцинтиллятора в условиях больших радиационных нагрузок, например, в калориметре следующего поколения для большого адронного коллайдера. Ранее в работе [5] было показано, что облучение кристаллов $\text{GAGG}:\text{Ce}$ высокоэнергетическими частицами приводит к появлению наведенного поглощения в УФ области. При этом наличие примесных ионов Ce^{3+} затрудняет анализ данных полос наведенного поглощения, поскольку Ce^{3+} обладают поглощением в УФ области. Также предыдущие исследования в основном посвящены кристаллам $x=2, 3$ как наиболее перспективным для указанных применений [5,6].

Целью настоящей работы является изучение влияния катионного состава беспримесных кристаллов гранатов $\text{Gd}_3\text{Al}_x\text{Ga}_{5-x}\text{O}_{12}$ ($x = 0, 1, 2, 3$) на радиационную стойкость при воздействии протонного облучения.

Монокристаллы были выращены методом Чохральского компанией ФОМОС-Материалс, Москва. Кристаллы были облучены протонами с энергией 6.7 МэВ из 120-см циклотрона НИИЯФ МГУ. Флуенс пучка протонов на поверхности кристаллов составлял $1.4 \cdot 10^{14}$ протонов/см².

Показано, что облучение протонами привело к появлению наведенного поглощения в области прозрачности кристаллов. Облученные кристаллы характеризуются появлением дополнительных широких полос поглощения с максимумами при 3.0 и 3.9 эВ. Одновременно в области 4.4-5.4 эВ наблюдалось снижение поглощения после облучения кристаллов. Предполагается, что данные эффекты связываются как с перезарядкой уже существующих, так и с появлением новых дефектов в кристаллах. Показано, что интенсивность полос наведенного поглощения зависит от состава кристаллов и увеличивается с понижением содержания алюминия. Также обнаружено, что интенсивность полос наведенного поглощения уменьшается со временем.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант № 075-15-2021-1353). Автор выражает благодарность Спасскому Д.А., Спасскому А.В. за помощь в проведении измерений и протонного облучения кристаллов.

1. Lecoq P. Development of new scintillators for medical applications // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A: – 2016. – Т. 809. – С. 130-139.
2. Alenkov V. et al. Irradiation studies of a multi-doped $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ scintillator // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A: – 2019. – Т. 916. – С. 226-229.
3. Yoneyama M. et al. Evaluation of GAGG: Ce scintillators for future space applications // Journal of Instrumentation. – 2018. – Т. 13. – №. 02. – С. P02023.
4. Korzhik M. et al. Ce-doped $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ scintillator for compact, effective and high time resolution detector of the fast neutrons // arXiv preprint arXiv:1807.06390. – 2018.
5. Dilillo G. et al. Space applications of GAGG: Ce scintillators: a study of afterglow emission by proton irradiation // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B: – 2022. – Т. 513. – С. 33-43.
6. Sakano M. et al. Estimating the radiative activation characteristics of a $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$: Ce scintillator in low earth orbit // Journal of Instrumentation. – 2014. – Т. 9. – №. 10. – С. P10003.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОСОМНЫХ БАКТЕРИОХЛОРОФИЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ ВОДОЕМОВ С АНОКСИГЕННЫМИ ФОТОТРОФНЫМИ БАКТЕРИЯМИ БЕЛОМОРСКОГО РЕГИОНА

Филиппова О.А.

МГУ им. М. В. Ломоносова», физический факультет, Москва, Россия

E-mail: filolik_edu@mail.ru

В водоемах с сильной стратификацией на границе между верхним кислородным и нижним бескислородным слоями при наличии солнечного света создаются благоприятные условия для развития анаэробных фототрофов, в частности, зелёных серных бактерий (ЗСБ). В фотосинтетическом аппарате ЗСБ в специальных органеллах, хлоросомах, в агрегированной форме содержатся хлоросомные бактериохлорофиллы (Бхл) – основные фотосинтетические пигменты ЗСБ. В зависимости от типа Бхл и каротиноидов ЗСБ делят на две формы – зелёноокрашенную и коричневоокрашенную. Наличие в клетках бактерий Бхл *d* говорит о присутствии зеленоокрашенной формы ЗСБ, а наличие Бхл *e* – коричневоокрашенной формы ЗСБ. Обычно ЗСБ при фотосинтезе используют сероводород, поэтому их присутствие в водной среде позволяет выявить сероводородное заражение водоёма, поэтому изучение оптических характеристик воды крайне важно для экологического мониторинга [1].

С помощью детектирования Бхл *d* или Бхл *e* можно определить наличие ЗСБ в анаэробном слое воды, что будет являться признаком сероводородного заражения. Существует несколько методов для расчета концентраций Бхл *d* и Бхл *e* в воде [2]. Первый метод связан с использованием эмпирической формулы, основанной на применении закона Бугера-Ламберта-Бера: при измерении спектров поглощения экстрактов концентрацию можно рассчитать как отношение оптической плотности экстракта в максимуме полосы поглощения к произведению коэффициента экстинкции Бхл в растворителе на длину оптического пути. Для расчета концентрации пигмента должны быть известны коэффициенты экстинкции соответствующего Бхл. Этот метод также позволяет рассчитывать суммарную концентрацию Бхл при одновременном присутствии Бхл *d* и Бхл *e* с учетом соотношения между содержанием Бхл *d* и Бхл *e*. Второй метод количественного определения Бхл позволяет делать расчет концентрации Бхл *d*, *e* по спектрам поглощения воды, без приготовления экстрактов как произведение коэффициента $A = (336 \pm 9)$ мг/(нм³) на площадь длинноволновой полосы в спектрах поглощения Бхл [3]. Также

концентрацию Бхл можно определить по флуоресценции его экстракта. При сравнении методов в статье [2] было получено, что наиболее точным методом является первый, кроме случаев малой концентрации Бхл, порядка мг/м^3 : в этом случае лучше использовать третий метод.

Целью данной работы является расчет и сравнение концентраций хлоросомных Бхл в озере Еловом и Лагуне на Зеленом мысе. Пробы воды из обоих водоёмов отобраны в экспедиции в сентябре 2022 г. Спектры поглощения измерены с помощью спектрофотометра Solar PV2201. Поскольку в оз. Еловом присутствует как Бхл *d*, так и Бхл *e*, концентрация Бхл была рассчитана с помощью второго метода. В Лагуне на Зеленом мысе содержится только Бхл *e*, и концентрация пигмента была рассчитана первым способом (см. Рисунок 1) с помощью коэффициента экстинкции для Бхл *e*.

Наибольшая суммарная концентрация Бхл в оз. Еловом приходится на глубину 3,025 м и составляет 4754 мг/м^3 , а максимальная концентрация Бхл *e* в Лагуне на Зеленом мысу составляет 8453 мг/м^3 на глубине 5,3 м. В работе [3] представлены расчеты концентрации Бхл в пробах воды, отобранных в ходе экспедиции в сентябре 2019 г. По тем данным, наибольшая концентрация в Лагуне на Зеленом мысе также приходится на глубину 5,3 м, а в озере Еловом – 3,175 м. В работе [4] приведен расчет суммарной концентрации Бхл *d* и *e* в озере Еловом в июле 2016 года и максимальная концентрация была зарегистрирована на глубине 2,95 м и составила $4130 \pm 120 \text{ мг/м}^3$. Таким образом, можно сделать вывод, что максимальная концентрация Бхл в озёрах меняется от года к году (до 1,5 раз в летний сезон), однако распределение по глубине хлоросомных Бхл (глубина максимальной концентрации Бхл в каждом озере) меняется несущественно, если сравнивать данные для летнего сезона в рассмотренных водоёмах.

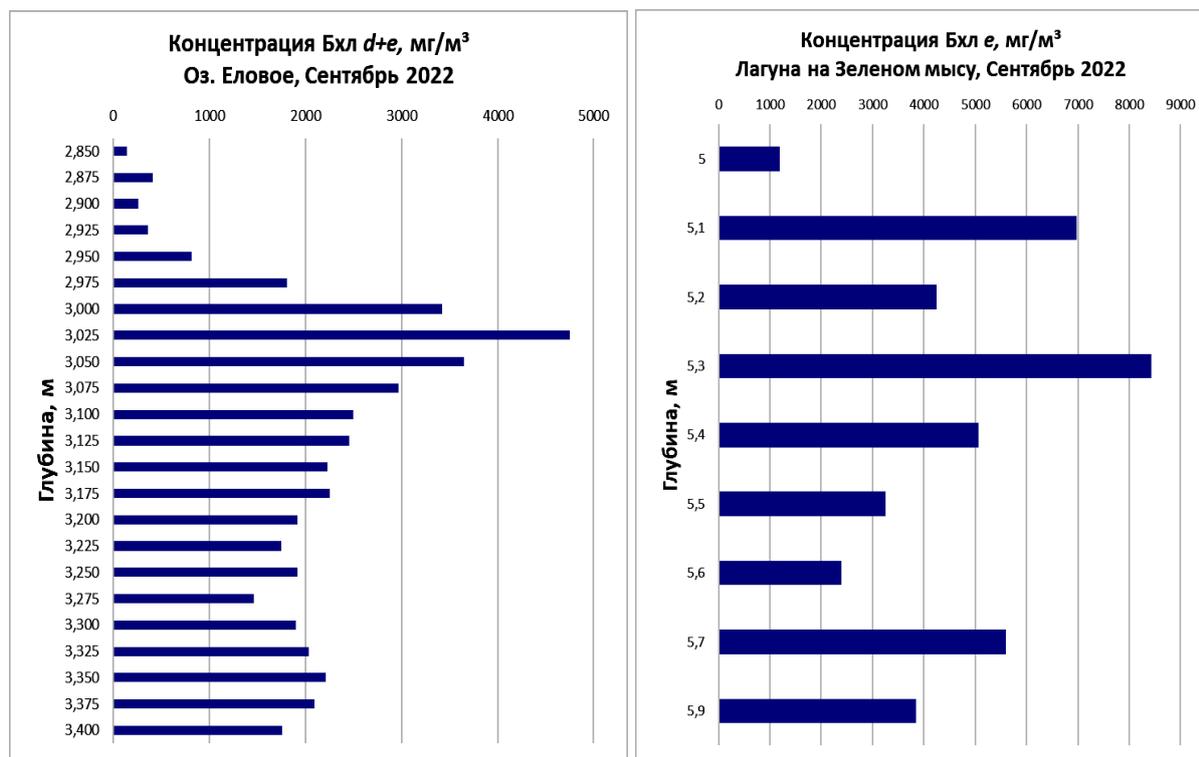


Рисунок 1. Распределение концентрации Бхл по глубине для проб воды из озера Еловое (слева) и Лагуны на Зеленом мысе (справа) в сентябре 2022 г.

Работа выполнена под научным руководством аспирантки физического факультета Жильцовой А.А. и доцента физического факультета к.ф.-м.н. Пацаевой С.В. Автор благодарит сотрудника Беломорской биостанции МГУ к.б.н. Краснову Е.Д. и сотрудника ИППИ РАН им. А.А. Харкевича к.б.н. Воронова Д.А за предоставленные пробы и обсуждение результатов.

Литература

1. Жильцова А.А., Харчева А.В., Краснова Е.Д., Лунина О.Н., Воронов Д.А., Саввичев А.С., Горшкова О.М., Пацаева С.В. Спектральное исследование зелёных серных бактерий в стратифицированных водоёмах Кандалакшского залива Белого моря // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 3. С. 233–239.
2. Жильцова А.А., Филиппова О.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Пацаева С.В. Сравнительный анализ спектральных методов определения концентрации бактериохлорофилла *d* зелёных серных бактерий в воде // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 04. С. 312–318.
3. Емельянцева П.С., Жильцова А.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Рымарь В.В., Пацаева С.В. Определение концентрации хлоросомных бактериохлорофиллов по спектрам поглощения клеток зелёных серных бактерий в пробах природной воды // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2020. № 2. С.25–30.
4. Харчева А.В., Жильцова А.А., Лунина О.Н. и др. Флуоресценция бактериохлорофиллов зелёных серных бактерий в анаэробной зоне двух природных водоёмов // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2018. № 4. С. 40–45.

ВЛИЯНИЕ АТОМОВ ГАЛОГЕНОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА НОВЫХ КООРДИНАЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИОНА Eu^{3+}

Цориева А.В., Коршунов В.М., Тайдаков И.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: tsorievaav@gmail.com

В настоящее время существует ряд практических задач, связанных с разработкой новых органических светоизлучающих диодов, биовизуализацией в лабораторных исследованиях и медицине, а также с применением люминесцентной сенсорики.

Одним из классов соединений, которые могут быть применены для решения всех поставленных задач, являются координационные соединения трехвалентного иона европия с молекулами органического лиганда. Люминесценция иона обусловлена излучательными электронными переходами внутри электронной оболочки этого иона. Лигандное окружение поглощает энергию, падающего света и передает энергию электронного возбуждения на центральный ион через триплетное состояние лиганда.

Регулируя процессы переноса энергии внутри лигандного окружения можно добиться повышения эффективности люминесценции комплекса. Известно, что замещение углерода галогеном в ароматическом фрагменте лиганда приводит к возрастанию скорости интеркомбинационной конверсии пропорционально четвертой степени зарядового числа данного атома. Однако, в настоящий момент в литературе практически не представлены данные о влиянии замещения водорода галогеном в ароматических фрагментах 1,3-дикетонных лигандов на спектрально-люминесцентные свойства координационных соединений ионов лантаноидов. Таким образом, цель данной работы установить влияние введения атомов фтора (F), хлора (Cl), брома (Br) и йода (I) в ароматические заместители 1,3-дикетонных лигандов на процессы передачи и релаксации энергии, спектрально-люминесцентные свойства и эффективность люминесценции координационных соединений иона Eu^{3+} .

В качестве объектов исследований было выбрано четыре комплекса с органическими лигандами из класса 1,3-дикетонов, в заместителе которых два атома водорода замещены двумя тяжелыми атомами с разными зарядовыми числами (F, Cl, Br, I). Дополнительно исследован комплекс с центральным ионом Eu^{3+} и лигандом Dibenzoylmethane (DBM). Для минимизации процесса тушения люминесценции в каче-

стве вспомогательного электрически нейтрального лиганда выступает 1,10-фенантролин.

На рисунке 1 представлены кинетики люминесценций исследуемых соединений на длине волны 612 нм.

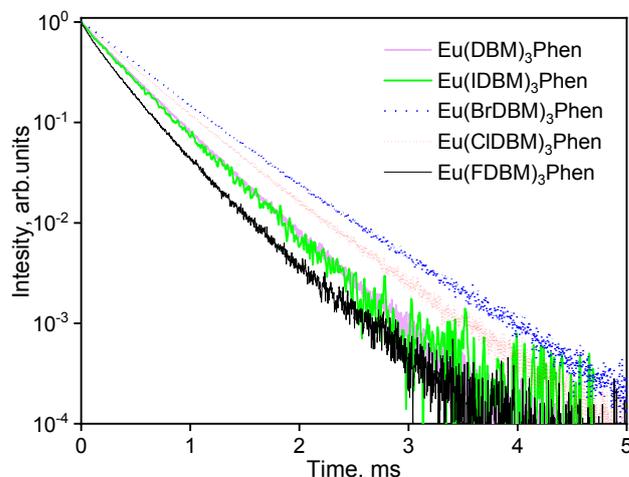


Рис. 1. Кинетики люминесценции соединений на длине волны 612 нм

Экспериментально доказано, что введение атомов галогена действительно влияет на спектрально-люминесцентные свойства координационных соединений. Наиболее эффективную люминесценцию проявляют комплексы, содержащие атомы хлора. Замещение водорода хлором в ароматическом фрагменте лиганда приводит к увеличению квантового выхода на 41 %. При этом время жизни возбужденного состояния значительно возрастает с 414 мкс до 500 мкс. Квантовый выход люминесценции соединения *Eu(ClDBM)₃Phen* достигает 64 %. Установлена прямая зависимость между значением энергии первого возбужденного триплетного состояния лиганда и квантовым выходом люминесценции комплекса. Резкое возрастание квантового выхода хлорсодержащего комплекса относительно остальных можно объяснить наиболее оптимальным энергетическим зазором между первым триплетным уровнем лиганда и резонансным уровнем иона Eu^{3+} .

Литература

1. Interpretation of europium(III) spectra Koen Binnemans * KU Leuven, Department of Chemistry, Celestijnenlaan 200F, P.O. Box 2404, B-3001 Heverlee, Belgium
2. K. Binnemans, C. Görller-Walrand, On the color of the trivalent lanthanide ions, *Chemical Physics Letters* (235) (1995) 163–174.
3. S. Faulkner, S. J. A. Pope, B. P. Burton-Pye, Lanthanide Complexes for Luminescence Imaging Applications, *Applied Spectroscopy Reviews* 40 (2005) 1–31. doi:10.1081/ASR-200038308.
4. J.-C. G. Bünzli, C. Piguet, Taking advantage of luminescent lanthanide ions, *Chemical Society Reviews* 34 (12) (2005) 1048. doi:10.1039/b406082m. URL <https://doi.org/10.1039/b406082m>
5. Sasikumar, D., John, A. T., Sunny, J., & Hariharan, M. (2020). Access to the triplet excited states of organic chromophores. *Chemical Society Reviews*, 49 (17), 6122-6140.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ФОСФАТОВ С ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ, АКТИВИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Шабалина Е.М.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
E-mail: shabalinaekm@gmail.com

Индустрия светодиодов активно развивается, что вызывает интерес к поиску и изучению люминофоров, подходящих для использования в светодиодах. Белые светодио-

ды обладают рядом преимуществ по сравнению с люминесцентными лампами, в частности, низким энергопотреблением, высокой эффективностью, более длительным сроком службы (до 100000 ч) [1]. Перспективными люминофорами для белых светодиодов являются фосфаты со структурой типа НАСИКОН, которые относятся к суперионным проводникам. Например, $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3:\text{Eu}^{2+}$ и $\text{Na}_{3.6}\text{Y}_{1.8}(\text{PO}_4)_3:\text{Eu}^{3+}$ фосфаты показали высокую температурную стабильность, что связано с образованием дополнительных каналов переноса энергии с электронных и дырочных ловушек к активатору при увеличении температуры [2,3]. В данной работе представлены результаты исследования люминесцентных свойств беспримесных и активированных РЗ элементами фосфатов со структурой НАСИКОН в широком температурном и энергетическом диапазоне.

Серии фосфатов $\text{Na}_{3.6}\text{Y}_{1.8}(\text{PO}_4)_3$ и $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$, беспримесных и активированных Ce^{3+} или Eu^{3+} , получены методом твердофазного синтеза. Рентгенофазовый анализ показал отсутствие примесных фаз в синтезированных образцах. Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции в УФ диапазоне измерены на лабораторной установке ОФПКЭ НИИЯФ МГУ в температурном диапазоне 77-500 К. Спектры в ВУФ области, а также температурные зависимости в диапазоне 6-300 К были получены на установке для ВУФ люминесцентной спектроскопии в Институте Физики Тартуского университета.

Проведены исследования люминесцентных свойств натрий-содержащих фосфатов и проанализирована природа полос свечения. Собственное свечение, связанное с автолокализованными экситонами, наблюдалось исключительно для $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$ при ВУФ возбуждении. Полосы люминесценции в области 325-340 нм, характерные для обоих соединений, приписаны дефектам кристаллической структуры, предположительно комплексам с кислородными вакансиями. В спектрах люминесценции $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3$, активированных Ce^{3+} или Eu^{3+} , доминируют полосы, связанные с внутриконтинуальными переходами в ионах Eu^{3+} или межконтинуальными переходами в ионах Ce^{3+} . Установлено, что в спектре возбуждения свечения европия в $\text{Na}_3\text{Sc}_2(\text{PO}_4)_3:\text{Eu}^{3+}$ доминирует полоса с переносом заряда, в то время как в спектре $\text{Na}_{3.6}\text{Y}_{1.8}(\text{PO}_4)_3:\text{Eu}^{3+}$ также наблюдаются полосы, соответствующие 4f-4f переходам в Eu^{3+} .

Литература

1. Fang, Mu-Huai, Bao, Zh. et al, Chem. Rev., 2022, 122, 11474-11513.
2. Kim, Y. H., Arunkumar, P. et al, Nature materials, 2017, 16(5), 543-550.
3. Farooq, U., Sun, X. et al, Journal of Alloys and Compounds, 2020, 821, 153513.

КР СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДНОГО РАСТВОРА А-ХИМОТРИПСИНА ПРИ НАНОСЕКУНДНОМ ИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 532 НМ

Швыдя А.О., Брандт Н.Н.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

E-mail: shvydia.ao19@physics.msu.ru

В современном мире для анализа молекулярных и атомных структур широко применяют метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. В качестве возбуждающего излучения используются непрерывные (Nd:YAG, Ar^+ , полупроводниковые и т.д.) или импульсные (Nd:YAG, Ti:Sa и т.д.) лазеры (см., например, [1]). Используемые при этом длины волн возбуждения, как правило, лежат в интервале от 355 до 1064 нм. Средняя мощность возбуждения варьируется обычно от нескольких милливатт до десятков ватт, а частота повторения импульсов – от единиц герц до сотен килогерц. Длительность импульсов также меняется в широких пределах от десятков фемтосекунд до сотен наносекунд (см., например, [2-3]). Однако вопрос о возможных отличиях КР

спектров одного и того же вещества при использовании импульсного и непрерывного лазерного возбуждения не рассматривается.

Работа посвящена определению изменений КР спектра водного раствора α -химотрипсина при изменении параметров возбуждающего излучения.

Измерения проводятся на лабораторном КР спектрометре [4]. Источником непрерывного излучения служит твердотельный лазер с диодной накачкой (532 нм) с мощностью от 50 до 400 мВт. Для импульсного возбуждения используется вторая гармоника Nd:YAG лазера (523 нм), с длительностью импульса 100 нс, частотой повторения от 0,2 до 1 кГц и диапазоном энергий импульса 0,05-2,5 мДж. Рассеянное под 90° излучение собирается и фокусируется с помощью системы объективов с notch-фильтром на входную щель полихроматора. Спектр регистрируется ПЗС камерой, сигнал с которой анализируется с помощью программного обеспечения WinSpec/32.

В качестве образца используется раствор лиофилизованного α -химотрипсина в дистиллированной воде для инъекций в концентрации 90 мг/мл. Раствор находится в кювете при постоянной температуре 20°C . В ходе эксперимента раствор постоянно перемешивается с помощью оптоволоконна, прикреплённого к мотору.

Было получено, что спектральные линии не меняются при изменении мощности непрерывного лазерного возбуждения от 50 до 400 мВт, при изменении энергии импульса от 0,05 до 2,5 мДж и при изменении частоты повторения импульсов от 0,2 до 1 кГц. Обсуждается зависимость интенсивности КР сигнала от мощности возбуждения.

Работа выполнена за счёт средств гранта РФФИ № 21-78-10077.

Литература

1. W. Zhang et al. Raman spectroscopic techniques for detecting structure and quality of frozen foods: principles and applications. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2021, 61(16), 2623-2639. Doi:10.1080/10408398.2020.1828814.
2. D. Wei et al. Review of Fluorescence Suppression Techniques in Raman Spectroscopy, Appl. Spec. Rev. 2015 50(5), 387-406. Doi: 10.1080/05704928.2014.999936.
3. C. Yang et al. Picosecond Kerr-gated Raman spectroscopy for measurements in sooty and PAH rich hydrocarbon flames, Proc. Combust. Inst. 2021, 38(1), 1797-1804. Doi: 10.1016/j.proci.2020.07.101.
4. N.N. Brandt, A.Yu. Chikishev. Laser Raman spectrometer for the studies of biomolecules with monitoring temperature of the samples, Las. Phys. 2002, 12(4), 647-652.

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЦИФРОВОГО МИКРОСКОПА С РЕГУЛИРОВКОЙ УВЕЛИЧЕНИЯ ДО СЕМИДЕСЯТИ КРАТ

Шевченко Д.В.

С-Пб. ТУ Петра Великого, ИЭиТ, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: shevchenko.dv@edu.spbstu.ru

Ещё с давних времен люди пытались увидеть то, что сложно, а порой и невозможно рассмотреть невооружённым глазом. Это стремление привело к созданию линз, а затем и более сложной оптической системы — микроскопа. Дальнейшее развитие оборудования способствовало созданию цифрового микроскопа, что помогло автоматизировать процесс управления устройством, а также проводить более глубокие исследования и анализ с помощью компьютера [1]. В наше время микроскопы применяются во многих областях науки, например для исследования клеток и бактерий в биологии, конструирования микросхем в микроэлектронике, изучения молекулярного состава веществ в химии и т.д. [2]. Помимо своих значительных преимуществ, современные микроскопы имеют ряд недостатков. Как правило, они габаритны и обладают большим весом, что делает их мобильность крайне низкой. Кроме того, стоимость многих микро-

скопов достаточно высока, из-за чего они становятся недоступными для большого числа исследователей.

Таким образом, создание простой модели микроскопа, которая учитывает вышеперечисленные недостатки, является актуальной проблемой. Одним из возможных решений является устройство, конструкция которого показана на рис. 1.

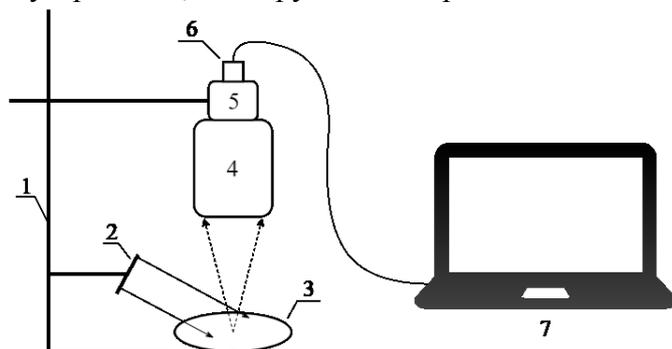


Рис. 1. Структурная схема цифрового микроскопа: 1 – модульный штатив, 2 – светодиодная матрица; 3 – исследуемый объект; 4 – объектив; 5 – переходной цилиндр; 6 – светочувствительная матрица; 7 – ноутбук/компьютер, считывающий изображение.

Разработанная модель предполагает возможность замены объектива, что позволяет регулировать увеличительную способность микроскопа без потери качества изображения. Ещё одним конструктивным преимуществом является тот факт, что микроскоп можно легко разобрать на небольшие части, компактно упаковать и переместить на большие расстояния. Также к достоинствам можно отнести электрическое питание от компьютера (ноутбука). С помощью программного обеспечения можно приблизить или отдалить изображение, увеличить контраст его исследуемой части. Вся информация выводится на экран компьютера в реальном времени, она легко может быть сохранена и передана на расстояние.

В качестве примера на рис. 2 представлен результат исследования объекта (серьги) с использованием изготовленной конструкции. Размер объекта показан на рис. 3.



Рис. 2. Изображение исследуемого объекта, полученное микроскопом с увеличением 60 крат.



Рис. 3. Размеры исследуемого объекта.

Проведенные исследования позволили установить возможности применения разработанной конструкции микроскопа для получения различных изображений: структур, дефектов, а также мелких деталей на поверхности предметов. Заложенный в конструкцию диапазон изменения кратности от 20 до 70 крат подтверждается чёткостью изображений, полученных при исследовании различных объектов. Определены направления для дальнейшего улучшения конструкции микроскопа по увеличению как кратности и качества формируемого изображения, так и расстояния до исследуемого объекта.

Литература

1. Черенков В.Г., Пасевич К.Г., Кабиров В.А., Гулков И.В., Рисс М.Е., Науменко Е.С. Цифровые технологии диагностики ранних признаков поверхностно-распространяющихся меланом // Вестник Новгородского государственного университета. 2020. №1(117). С. 128-131.
2. García-Bonillo C., Texidó R., Gilabert-Porres J., Borrós S. Plasma-induced nanostructured metallic silver surfaces: study of bacteriophobic effect to avoid bacterial adhesion on medical devices // Heliyon. 2022. V. 8(10). P. 1-12.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ И КОЛЛИМАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Шепелев А.Е.1, Путилов А.Г. 1, Антипов А.А.2

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника РАН», Шатура, Россия*

E-mail: ae_shepelev@mail.ru

Сегодня квантово-каскадные лазеры (ККЛ) являются компактными и эффективными источниками излучения среднего ИК и ТГц диапазона спектра, что позволяет использовать их в различных областях науки и техники [1]. Применение ККЛ в различных приложениях сопровождается рядом трудностей связанных с большой эллиптичностью выходного пучка и высоким значением ширины диаграммы направленности излучения (десятки градусов) [1]. Таким образом, для эффективного применения ККЛ необходимо использовать оптическую систему, позволяющую формировать коллимированное излучение с минимально возможным астигматизмом пучка. В рамках настоящей работы представлен обзор и анализ способов уменьшения астигматичности пучка и коллимации излучения ККЛ.

Для преобразования формы пучка излучения возможно использование пары анаморфных призм, что обеспечивает увеличение или уменьшение размера пучка вдоль «быстрой» оси (в направлении роста гетероструктуры). При этом размер пучка в направлении «медленной» оси (в плоскости подложки) остается неизменным. Использование призм может изменить размер пучка, но не изменит расходимость.

Получить круговую форму пучка с гауссовым распределением интенсивности и коррекцией астигматизма можно, если использовать одномодовый световод. Такой световод с длиной, гораздо большей длины волны лазерного излучения, может достаточно эффективно «смешивать» пучок, в результате чего пучок на выходе из световода теряет поперечные пространственные характеристики, но остается когерентным. Кроме кругового сечения, выходной пучок имеет гауссовый профиль и характеризуется отсутствием астигматизма [2].

Один из простых способов коллимации излучения ККЛ основан на использовании однолинзовой оптической системы или системы состоящей из двух и более линз. При этом могут быть применены сферические, асферические или аксиконовые линзы [2,3]. Нередко для коллимации и формирования пучка излучения ККЛ используют микролинзы [2].

Особый интерес сегодня представляют плоские диэлектрические метаповерхностные линзы, которые используются в качестве оптических систем коллимации одномодового излучения ККЛ среднего ИК диапазона [4].

Литература

1. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Мыльников В.Ю. и др. Исследование пространственных характеристик излучения квантовых каскадных лазеров для спектрального диапазона 8 μm . // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46 (22). С. 51-54.
2. Демкин В., Демкин А., Шадрин М., Будагов Ю. Лазерные опорные системы // *Фотоника*. 2012. 3 (33). С. 38-44.
3. Шепелев А.Е., Путилов А.Г., Антипов А.А., Ангелуц А.А. Формирование излучения квантового-каскадного лазера среднего ИК диапазона. // *Квантовая электроника*. 2022. Т. 52 (9). С. 779-782.
4. Arbabi A., Briggs R.M., Horie Yu, Bagheri M., Faraon A. Efficient dielectric metasurface collimating lenses for mid-infrared quantum cascade lasers // *Optics express*. 2015. 23 (26).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ, ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ РАСПРОСТРАНЕНИЕ БЛОХОВСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Шурубур Г.П.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

shurubura@nanolab.phys.msu.ru

Актуальной задачей современной фотоники является оптическое управление частицами. Распространённым способом управления является метод оптического пинцета. Другим способом оптического контроля является локализация частиц в поле блоховской поверхностной электромагнитной волны (БПВ), являющейся оптическим состоянием между фотонным кристаллом (ФК) и диэлектриком

Недавно показано что с ФК, поддерживающие БПВ на границе с водой на можно осуществлять захват частиц [1]. Интересной задачей является придание направленности движения частиц с помощью направленных каналов или волноводов. В качестве диэлектрика благодаря свойствам БПВ могут выступать низкоиндексные материалы, например полимеры. В таком случае можно использовать методы лазерной печати для создания волноводов.

В данной задаче, волноводы изготавливаются в виде прямого либо изогнутого волновода и непрерывно примыкающего к нему треугольника, служащего для увеличения эффективности заведения излучения в волновод. Структуры изготавливаются методом двухфотонной лазерной литографии [1]. Суть данного метода заключается прохождении лазерного луча в пленке фоторезиста SU-8 толщиной 200 нм. В области перетяжки лазерного пучка происходит полимеризация молекул фоторезиста, благодаря эффекту двухфотонного поглощения в SU-8.

Необходимо было отработать методику изготовления. Сложностью являлся подбор оптимальных параметров печати и определение параметров структур. С помощью программного пакета Python была оптимизирована программа составления файлов для печати. Печать производилась в несколько слоёв, для решения проблемы несовпадения плоскости, в которой перемещается луч лазера и плоскости поверхности пленки, а также производилось варьирование по мощности образцов. Образцы, получаемые в ходе варьирования параметров, были исследованы с помощью АСМ. Высота и ширина участков волновода были в диапазонах 180-200 нм и 980-1020 нм соответственно, благодаря чему волноводы являются одномодовыми.

После изготовления образца и измерения на АСМ параметров структур, изготавливается ячейка с суспензией, содержащей молекулы полистирола. Эксперимент по оптическому захвату производится с помощью установки оптического пинцета [3].

Литература

1. Abrashitova K. A. et al. Bloch Surface Wave Photonic Device Fabricated by Femtosecond Laser Polymerisation Technique // Appl. Sci. 8(1), 63 (2018)
2. Shilkin D. A. et al Direct measurements of forces induced by Bloch surface waves in a one-dimensional photonic crystal //Opt. Lett. 40, 4883-4886 (2015)
3. Shilkin D. A. et al. Trap position control in the vicinity of reflecting surfaces in optical tweezers// JETP Lett. 98(10), 644-647 (2014)

СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ ОБРАТНЫХ МИКРОМУЛЬСЫЙ В ПРОЦЕССЕ СИНТЕЗА В НИХ НАНОЧАСТИЦ ZnS

Волков Р.Р.¹, Пластинин И.В.²¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия²НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, РоссияE-mail: ramilvolkov92920@gmail.com

Синтез полупроводниковых наночастиц вызывает большой интерес исследователей в связи с их особыми физическими свойствами и широким применением в различных

областях науки и промышленности [1–3]. Наночастицы оксидов и сульфидов металлов, в том числе, сульфид цинка ZnS, часто используются для окисления органических веществ при очистке сточных вод благодаря их фотокаталитическим свойствам [4]. Многочисленные функции и свойства указанных наночастиц обеспечивают большой потенциал их использования в качестве наноразмерных строительных блоков в биосенсорах [5]. Показано, что наночастицы ZnS могут использоваться для создания электрода суперконденсатора [6] и демонстрируют превосходную, но кратковременную антибактериальную эффективность в отношении грамположительных и грамотрицательных образцов из-за своей агломерированной природы [7].

Как известно, от размеров и формы наночастиц существенно зависят их свойства, поэтому для практических целей важен высокий уровень монодисперсности применяемых наночастиц [8]. Мицеллярный синтез, в частности, синтез в обратных микромульсиях, позволяет получать наночастицы с достаточно узким распределением по размерам. Однако, определение размеров синтезированных наночастиц осуществляется уже после завершения реакции синтеза и всевозможных трудоёмких и времязатратных процедур очистки. Таким образом, разработка метода дистанционного контроля за размерами синтезирующихся наночастиц в режиме реального времени является весьма актуальной задачей. Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) является дистанционным и очень информативным методом, который позволяет в режиме реального времени определять свойства компонентов раствора [9].

В данной работе с помощью спектроскопии КР исследовались обратные микромульсии, в которых проводилась реакция синтеза наночастиц ZnS. Полученные результаты позволили разработать бесконтактный и экспрессный метод диагностики обратных микромульсий в процессе синтеза в них наночастиц ZnS с целью контроля размеров синтезируемых наночастиц.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-12-00138, <https://rscf.ru/project/22-12-00138/>.

Литература

1. X.S. Fang, Y. Bando, U.K. Gautam, T.Y. Zhai, H.B. Zeng, X.J. Xu, M.Y. Liao, D. Golberg, ZnO and ZnS Nanostructures: Ultraviolet-Light Emitters, Lasers, and Sensors, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 34 (2009) 190 doi.org/10.1080/10408430903245393
2. X.S. Fang, Y. Bando, M.Y. Liao, U.K. Gautam, C.Y. Zhi, B. Dierre, B.D. Liu, T.Y. Zhai, T. Sekiguchi, Y. Koide, D. Golberg, Single-Crystalline ZnS Nanobelts as Ultraviolet-Light Sensors, *Adv. Mater.* 21 (2009) 2034 doi.org/10.1002/adma.200802441
3. A.M. Smith, S.M. Nie, Semiconductor Nanocrystals: Structure, Properties, and Band Gap Engineering, *Acc. Chem. Res.* 43 (2010) 190 doi.org/10.1021/ar9001069
4. J. Bedía, V. M. Ramos, M. P. Garzón, A.G. Avilés, J. J. Rodríguez, C. Belver, A Review on the Synthesis and Characterization of Metal Organic Frameworks for Photocatalytic Water Purification, *Catalysts* 9(1) (2019) 52 doi.org/10.3390/catal9010052
5. M.F. Frasco, N. Chaniotakis Semiconductor Quantum Dots in Chemical Sensors and Biosensors *Sensors-Basel* 9 (2009) 7266 doi.org/10.3390/s90907266
6. T.F. Yia, Y. Lia, Y.M. Lib, S. Luoa, Y.G. Liua, ZnS nanoparticles as the electrode materials for high-performance supercapacitors, *Solid State Ionics* 343 (2019) 115074 doi.org/10.1016/j.ssi.2019.115074
7. S. Kumar, A. Jain, S. Panwar, I. Sharma, H.C. Jeon, T.W. Kang, R.K. Choubey, Effect of silica on the ZnS nanoparticles for stable and sustainable antibacterial application *International, J. Appl. Ceramic Technol.* 16 (2019) 531–540 doi.org/10.1111/ijac.13145
8. A. Kamyshny, M. Ben-Moshe, S. Aviezer, and S. Magdassi, *Macromol. Rapid Commun.* 26, 281 (2005) doi.org/10.1002/marc.200400522
9. I.V. Plastinin, S.A. Burikov, T.A. Dolenko, Laser diagnostics of reverse microemulsions: Influence of the size and shape of reverse micelles on the raman spectrum on the example of water/AOT/cyclohexane system. *Journal of Molecular Liquids* 325 (2021) 115153 doi.org/10.1016/j.molliq.2020.115153