

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
им. А. М. ПРОХОРОВА РАН»

ИНСТИТУТ ХИМИИ ВЫСОКОЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ РАН
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО
ПРАВИТЕЛЬСТВО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

ПРОГРАММА И МАТЕРИАЛЫ
19-й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

Саранск, 20–23 сентября 2022 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
имени Н. П. Огарёва



Нижегородский
государственный
университет
им. Н. И. Лобачевского

САРАНСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2022

УДК 537.533.3:621.3.049.77

ББК ВЗ

М 341

Редакционная коллегия:

*Н. С. Аверкиев, К. Н. Ельцов, К. Н. Нищев, П. А. Рябочкина (отв. ред.),
С. А. Тарасенко, С. А. Хрущалина (отв. секр.)*

М 341 **Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение : прогр. и материалы 19-й Междунар. науч. конф.-шк., Саранск, 20–23 сент. 2022 г. / редкол.: Н. С. Аверкиев [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2022. – 216 с.**
ISBN

В сборник включены конспекты лекций и тезисы докладов 19-й Международной научной конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», посвященные актуальным проблемам современного физического материаловедения. Рецензирование докладов осуществлено программным комитетом школы.

Научное издание

**МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

**Программа и материалы
19-й Международной научной конференции-школы**

Издательство Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24

ISBN

© Коллектив авторов, 2022
© ФГБОУ ВО «МГУ
им. Н. П. Огарёва», 2022
© Оформление. Издательство
Мордовского университета, 2022

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ УЧАСТНИКОВ

Конференция проводится Институтом физики и химии МГУ им. Н. П. Огарёва в период с 20 по 23 сентября 2022 года.

Программой конференции предусмотрены:

- обзорные доклады-лекции ведущих ученых по тематике конференции;
- выступления участников конференции с устными и стендовыми докладами.

Оргкомитетом установлена следующая продолжительность докладов: лекции – 45 мин., приглашенные доклады - 30 мин, устные сообщения – 15 мин.

Для демонстрации иллюстративных материалов лекторам и докладчикам будут предоставлены средства визуальной и компьютерной презентации. В последнем случае информация должна быть подготовлена в электронном виде с помощью Microsoft Power Point или в виде графических файлов: .jpg, .tif, .bmp.

Размеры щитов для размещения стендовых докладов – 90×120 см (ширина, высота).

РЕГИСТРАЦИЯ участников конференции будет проводиться 19 сентября с 15.00 до 18.00, 20 сентября с 8.00 до 12.00 в фойе главного корпуса МГУ им. Н.П. Огарёва (ул. Большевистская, 68).

О времени прибытия в Саранск просим заблаговременно сообщить по электронной почте: mnksh@yandex.ru. При наличии такой информации оргкомитетом будет организована встреча участников конференции по месту прибытия в любое время суток.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Адрес: 430000, г. Саранск, ул. Большевистская, 68а,
МГУ им. Н. П. Огарёва, ИФХ

Тел./факс: (8342) 24-24-44

E-mail: mnksh@yandex.ru, vnksh.secretary@mrsu.ru

Хрущалина Светлана Александровна

<http://www.vnksh.mrsu.ru>

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ
19-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ
«МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ И ВОЛОКОННОЙ
ОПТИКИ: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ»

Саранск, 20–23 сентября 2022 г.

Сопредседатели конференции-школы:

И. А. Щербаков академик РАН, Научный руководитель Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН

М.Ф. Чурбанов – академик РАН, Научный руководитель Института химии высококчистых веществ РАН

Организационный комитет:

Д.Е. Глушко – ректор МГУ им. Н. П. Огарёва, председатель

К.Н. Нищев – директор ИФХ МГУ им. Н. П. Огарёва, заместитель председателя

С.А. Хрущалина – ученый секретарь

Программный комитет

П.А. Рябочкина – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия, председатель;

Н.С. Аверкиев – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;

М.В. Дорохин – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

К.Н. Ельцов – д.ф.-м.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

Е.В. Жариков – д.т.н., РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия;

П.Г. Зверев – д.ф.-м.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

А.М. Зюзин – д.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия;

Е.Е. Ломонова – д.т.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

Г.Е. Малашкевич – д.ф.-м.н., Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Республики Беларусь, Минск, Беларусь;

К.Н. Нищев – к.ф.-м.н., МГУ им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия;

М.Н. Попова – д.ф.-м.н., Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия;

В.В. Семашко – д.ф.-м.н., Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;

С.Л. Семенов – д.ф.-м.н., НЦВО им. Е.М. Дианова РАН, Москва, Россия;

Г.С. Соколовский – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;

С.А. Тарасенко – д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия;

П.П. Федоров – д.х.н., ИОФРАН, Москва, Россия;

Е.В. Чупрунов – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;

А.С. Cefalas – Ph.D., National Hellenic Research Foundation, Athens, Greece;

I. Sildos – Ph.D., Tartu University, Tartu, Estonia.

Рабочая группа

А.В. Голубьев

И.Н. Евтеева

Л.А. Куликов

Е.Н. Лютова

А.А. Ляпин

Е.П. Трямкина

А.Д. Таратынова

Н.В. Моисеев

М.А. Пятаев

Н.В. Сидорова

Н.А. Ларина

С.А. Артемов

И.А. Юрлов

Т.В. Волкова

Информационный партнер конференции

www.photonics.ru



научно-технический журнал

ФОТОНИКА

Журнал «ФОТОНИКА» (PHOTONICS RUSSIA) – глубокое и подробное освещение вопросов, связанных с фотонными и оптическими технологиями, оптическими материалами и элементами, используемыми в оптических системах, оборудовании и станках.

ПРОГРАММА-ГРАФИК КОНФЕРЕНЦИИ-ШКОЛЫ

20 сентября 2022, вторник

13:00–13:30	ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ <i>Д.Е. Глушко, ректор МГУ им. Н. П. Огарёва, председатель Организационного комитета</i>
13:30–15:45	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ <i>Председатель: член-кор. РАН С.А. Тарасенко</i>
13:30–14:15	<u><i>Г.С. Соколовский</i></u> <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург</i> КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА
14:15–15:00	<u><i>Н.С. Аверкиев, М.Б. Лифшиц</i></u> <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург</i> ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ СПИНОВ ЯДЕР P И AS В КРЕМНИИ В УСЛОВИЯХ ЭПР В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
15:00–15:45	<u><i>С.В. Фирстов</i></u> <i>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва</i> ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ И УСИЛИТЕЛИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
15:45–16:00	ПЕРЕРЫВ
16:00–19:00	ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ <i>Председатель: д.ф.-м.н., проф. П.А. Рябочкина</i>
16:00–16:45	<u><i>А.В. Родина</i></u> <i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург</i> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ И КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ
16:45–17:30	<u><i>В.В. Осипов, В.В. Платонов, В.В. Лисенков, Е.В. Тихонов</i></u> <i>Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург</i> ГАЗОФАЗНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ И СЕЛЕНИДОВ С ПОМОЩЬЮ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ
17:30–18:15	<u><i>В.П. Минаев</i></u> <i>ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Москва</i> ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДА ЭНДОВЕНОЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ КООГУЛЯЦИИ ВАРИКОЗНО РАСШИРЕННЫХ ВЕН
18:15–19:00	<u><i>А.В. Булатов</i></u> <i>Колледж предпринимательства №11, Москва</i> ВКЛАД СОВЕТСКИХ И РОССИЙСКИХ УЧЁНЫХ В РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РОСТА КРИСТАЛЛОВ
19:15	ПРИВЕТСТВЕННЫЙ УЖИН

21 сентября 2022, среда

9:00–10:30		ЛЕКЦИИ Председатель: д.ф.-м.н., проф. П.А. Рябочкина	
9:00–9:45	С.Н. Сметанин Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЙАНИЕ С УЧАСТИЕМ ВТОРИЧНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МОД В КРИСТАЛЛАХ: ГЕНЕРАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНО УПЛОТНЕННЫХ МНОГОВОЛНОВЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ		
9:45–10:30	М.С. Каган ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ		
10:30–10:45	ПЕРЕРЫВ		
10:45–13:00	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ		
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ №1 ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ Председатель: д.ф.-м.н., С.Н. Сметанин		СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ №2 НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ Председатель: д.ф.-м.н., М.С. Каган
1	К.А. Субботин^{1,2}, Ю.И. Зими́на², К.В. Кулешова², Я.С. Диденко², П.А. Лойко³, С.К. Павлов^{1,2}, А.И. Титов^{1,2}, Д.А. Лис¹, О.Н. Лис¹ ¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ³ Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique, Université de Caen Normandie, Caen, France ОПТИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКЛИННЫХ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ СО СТРУКТУРОЙ ВОЛЬФРАМИТА		А.М. Слостухина, Д.А. Бутенков, К.И. Рунина, О.Б. Петрова Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва НОВЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ В СИСТЕМЕ PbCl₂-PbO-SiO₂
2	К.А. Subbotin^{1,2}, K.V. Kuleshova², Yu.I. Zimina², A.I. Titov^{1,2}, S.K. Pavlov^{2,1}, P.A. Volkov³, V.V. Sanina¹, D.A. Lis¹, Ya.S. Didenko² ¹ A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow ² Russian Chemical Technology University named after D.I. Mendeleev, Moscow ³ CCP SIC "Kurchatov Institute" – IREA, Moscow EFFECT OF ADDITIONAL DOPING WITH Li⁺ IONS ON THE MECHANICAL STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE LASER CRYSTAL Yb:ZnWO₄		К.Ф. Игнатова, М.Е. Комшина, О.Ю. Трошин, А.Д. Буланов Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород ПОЛУЧЕНИЕ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ОБОГАЩЕННОГО ²⁸Si, ²⁹Si, ³⁰Si

3	<p><u>Е.Н. Лашманов</u> Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН, Нижний Новгород ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТОГО СТЕКЛА СОСТАВА $Ge_{28}Sb_{12}Se_{60}$</p>	<p><u>М.В. Кудряшов, Н.В. Сомов</u> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНО ПОГЛОЩАЮЩЕГО СФЕРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА</p>
4	<p><u>И.В. Смирнов^{1,2}, П.Г. Зверев^{1,2}, А.А. Сироткин²</u> ¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ИСТОЧНИК ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРА НА ДВУХВАЛЕНТНЫХ ИОНАХ ХРОМА В КРИСТАЛЛЕ ZnSe</p>	<p><u>Н.А. Ларина¹, Е.Е. Ломонова², П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова^{2,3}</u> ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $ZrO_2-Sc_2O_3-Tb_2O_{3.5}$</p>
5	<p><u>Д. А. Морозов, Н.А. Ларина, Е.Е. Ломонова, П.А. Рябочкина</u> ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ $ZrO_2-Y_2O_3-Pr_2O_3$</p>	<p><u>А.Д. Молчанова, К.Н. Болдырев</u> Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОХРОМНОГО ЭФФЕКТА В ГЕРМАНАТЕ ВИСМУТА $Bi_{12}GeO_{20}$ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ</p>
6		<p><u>К.И. Рунина¹, А.Ю. Секачева¹, Л.В. Попкова¹, Р.И. Аветисов¹, О.Б. Петрова¹, Динь Чунг До², Тху Чанг Та², Ван Лыонг Нгуен³</u> ¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, ²Институт тропической стойкости, Вьетнамско-российский тропический центр, Ханой, Вьетнам ³Вьетнамско-российский тропический центр, Ханой, Вьетнам ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ</p>

7	<p>А.А. Южакова¹, Д.Д. Салимгареев¹, А.Е. Львов¹, П.В. Пестерева¹, В.М. Кондрашин¹, А.С. Корсаков¹, Л.В. Жукова¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КРИСТАЛЛОВ И КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА И ТАЛЛИЯ</p>
13:00–14:30	ПЕРЕРЫВ
14:30–16:00	ЛЕКЦИИ Председатель: д.ф.-м.н. П.Г. Зверев
14:30–15:15	<p>V. Pankratov¹, P.A. Ryabochkina², N.V. Sidorova², S.A. Artemov², E.E. Lomonova³, ¹Institute of Solid-State Physics, University of Latvia, Riga ²Mordovia State University, Saransk ³Prokhorov General Physics Institute, Moscow ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВУФ-ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</p>
15:15–15:30	ПЕРЕРЫВ
15:30–17:30	СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ
1	<p>И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенцов Ульяновский государственный университет Научно-технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновск МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С ДИСПЕРСИЕЙ КАСКАДНО ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ДЛИНЫ</p>
2	<p>И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенцов Ульяновский государственный университет Научно-технологический институт им. С.П. Капицы, Ульяновск ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСИЛИТЕЛЯХ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ</p>
3	<p>А.Н. Смирнова¹, Е.А. Поспелова^{1,2} ¹Гермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, НЦВО РАН, Москва ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ОПРЕДЕЛЁННУЮ МЕТОДОМ ДВУХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА</p>
4	<p>Д.Н. Каримов, И.И. Бучинская Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x}$ И $(Pb_{1-x}Cd_x)_{0.7}Ho_{0.3}F_{2.3}$ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СПЕКТРАЛЬНО- ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ</p>
5	<p>И.А. Глухов^{1,2}, Ю.С. Дадоев^{1,2}, F.F.L. Ventivegna², С.Г. Мусеев^{1,3} ¹Ульяновский государственный университет, Ульяновск ²Национальная инженерная школа г. Бреста, Бреста, Франция ³УФирЭ им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск УПРАВЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЕМ ОТРАЖЕННОГО ГАУССОВА ПУЧКА ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ</p>

6	А.Н. Севрюкова, В.В. Грибко, А.П. Прохоров Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ КДР ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБОРИТНОЙ ОПТИКИ
7	И.А. Макарова¹, М.В. Бузаева¹, В.А.Сергеев^{1,2} ¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск ² УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С МАГНИТНЫМИ МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ
8	И.Г. Гревцева, В.Н. Дерепко, А.С. Перепелица Воронежский государственный университет, Воронеж ТРАНСФОРМАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ АНСАМБЛЕЙ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА СВИНЦА В ПРИСУТСТВИИ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА
9	А.В. Кошелев, Н.А. Архарова, К.В. Хайдуков, Д.Н. Каримов ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ β-NaRF_4 ($R = \text{Y}, \text{Yb}, \text{Lu}$) СОЛЬВОТЕРМАЛЬНЫМ МЕТОДОМ
10	В.Г. Шенгуров, С.А. Денисов, В.Ю. Чалков, Н.А. Алябина, А.М. Тимова НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ГЕРМАНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ HW CVD, ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
11	А.В. Бакаева, Д.А. Бутенков, К.И. Рунина, О.Б. Петрова Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва СВИНЦОВЫЕ ФТОРОБОРАТНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, СОАКТИВИРОВАННЫЕ Er^{3+} И Lu^{3+}
12	Н.А. Хвальковский¹, И.В. Алтухов¹, М.С. Каган¹, С.К. Папроцкий¹, Н.Д. Ильинская², А.А. Усикова², А.Н.Баранов³, R. Teissier³ ¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва ² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С. Петербург ³ IES, Université Montpellier 2, CNRS, Montpellier, France ОСОБЕННОСТИ ТУННЕЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В СВЕРХРЕШЕТКАХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ
13	С.К. Папроцкий¹, И.В. Алтухов¹, М.С. Каган¹, Н.А. Хвальковский¹, Н.Б. Родионов², А.П. Большаков³, В.Г. Ральченко³, Р.А. Хмельницкий⁴ ¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва ² ТРИНИТИ, Москва, Троицк ³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ⁴ ФИ им. П.Н. Лебедева РАН, Москва ТРАНСПОРТ ДЫРОК В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ
14	А.М. Гурьянов¹, С.А. Гурьянов² ¹ Самарский государственный технический университет, Самара ² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРЕМНИЕВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
15	С.В. Васин¹, В.А. Сергеев^{1,2}, М.С. Ефимов² ¹ УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск ² Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ЭЛЕКТРОПРОДНОСТЬ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

16	<p>С.С. Зыкова¹, К.И. Рунина¹, О.Б. Петрова¹, М.Н. Маякова^{1,2}, М.О. Анурова³ ¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ³НТО ИРЭ-Полкус, Фрязино</p> <p>ИЗУЧЕНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В КВАЗИБИНАРНОЙ СИСТЕМЕ PbF₂ - EuF₃</p>
17	<p>К.Ф. Игнатова, М.Е. Комшина, А.Д. Плехович, Е.Е. Ростокينا, К.В. Балужева, А.М. Кутьин Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород</p> <p>ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СТЕКЛА BaO–V₂O₅–V₂O₃ И Er:YAG</p>
18	<p>В.А. Крутько¹, Д.В. Поминова², М.Г. Комова¹, К.В. Петрова¹ ¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНО-БОРАТОВ ЛАНТАНА-ГАДОЛИНИЯ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Yb³⁺, Er³⁺</p>
19	<p>А.А. Пакулева, Н.В. Сомов, Е.В. Чупрунов Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород</p> <p>О РАСПРОСТРАНЕННЫХ И РЕДКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГРУППАХ УПАКОВОК СИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЕДИНИЦ В КРИСТАЛЛАХ</p>
20	<p>К.С. Серкина, А.А. Трофимова, Д.В. Волкова, И.В. Степанова Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</p> <p>ВЛИЯНИЕ ОКСИДА НАТРИЯ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ</p>
21	<p>В.А. Соломатина, Т.С. Летагин, М.Б. Гришечкин, Д.А. Бутенков, К.И. Рунина, И.Х. Аветисов Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва</p> <p>ВЫСОКОЧИСТЫЕ СТЕКЛА TeO₂-ZnO ЛЕГИРОВАННЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ</p>
22	<p>П.В. Стрекалов¹, М.Ю. Андреева¹, М.Н. Маякова^{1,2}, О.Б. Петрова¹ ¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p>ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ PbF₂-YF₃ НА ОСНОВЕ 8-ОКСИХИНОЛЯТА ЛИТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ</p>
23	<p>П.В. Стрекалов¹, К.И. Рунина¹, М. Н. Маякова^{1,2}, О. Б. Петрова¹ ¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ФТОРИДА СВИНЦА И ФТОРИДА ИТТЕРБИЯ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ</p>
24	<p>М.Г. Лаверентьев^{1,2}, М.В. Воронов³, В.П. Панченко³, Ю.Н. Пархоменко^{1,4}, Н.Ю. Табачкова^{1,5} ¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва ²ООО "РМТ", Москва ³НИЦ «Курчатовский институт», Москва ⁴АО Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва ⁵Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p>СОПОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ, ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ (Bi, Sb)₂Te₃, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ЭКСТРУЗИИ И ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ</p>
25	<p>А.В. Кошелев, А.С. Орехов, Н.А. Архарова, Д.Н. Каримов ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва</p> <p>ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ «CORE/SHELL» НАНОЧАСТИЦ β-NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺ @SiO₂</p>

26	<p><u>Н.В. Варапай</u>¹, Г.П. Шевченко², В.А. Журавков² ¹Институт физики НАН Беларуси, Минск ²НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск ОСОБЕННОСТИ КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЛЮМИНОФОРОВ SrAl₂O₄:Ce³⁺, Mn²⁺</p>
27	<p><u>С.А. Букарев</u>, С.В. Гуцин, А.М. Кузьмин, А.А. Ляпин, М.В. Черное ¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск АП-КОНВЕРСИОННЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЮМИНОФОРОВ La₂O₂S:Er, Yb ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ</p>

22 сентября 2022, четверг

9:00–10:30	ЛЕКЦИИ Председатель: д.ф.-м.н. С.В. Фирстов
9:00–9:45	М.С. Иванов, П.Б. Родин, А.В. Рожков ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ЭФФЕКТ ГАННА: ОТ КЛАССИКИ К МОДЕРНУ
9:45–10:30	К.Н. Болдырев, М.Н. Попова Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ С РЕДКИМИ ЗЕМЛЯМИ
10:30–10:45	ПЕРЕРЫВ
10:45–12:30	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 3 НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ Председатель: д.ф.-м.н. П.Г. Зверев
1	Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова, А.Е. Львов, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова, Д.А. Белоусов, С.Е. Барыкина Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ AgCl – AgBr – AgI ДЛЯ МЕДИЦИНЫ
2	Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова, А.Е. Львов, А.С. Корсаков, Л.В. Жукова, А.А. Щукина, Д.В. Шатунова Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ СИСТЕМ $TiBr_{0,46}I_{0,54}$ – AgI И $TiCl_{0,74}Br_{0,26}$ – AgI
3	Г.В. Тихомирова, Т.К. Петросян, Г.В. Суханова, А.В. Тебеньков Уральский федеральный университет, Екатеринбург ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ГРАФИТЕ И ГРАФЕНЕ ПРИ ХОЛОДНОМ СЖАТИИ
4	А.С. Числов^{1,2}, М.А. Борик¹, А.В. Кулебякин¹, Е.Е. Ломонова¹, Ф.О. Милович², В.А. Мызина¹, Н.Ю. Табачкова^{1,2} ¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
5	Л.М. Савенко, Ю.В. Жегучева, И.В. Степанова Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ, АКТИВИРОВАННЫХ Er^{3+} И ПАРОЙ Er^{3+}/Yb^{3+}
6	Э.С. Сектаров^{1,2}, В.С. Седоев³, К.Н. Болдырев^{1,2} ¹ Институт спектроскопии РАН, Москва, Троицк ² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва ³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДОВЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В АЛМАЗАХ
7	Н.А. Ларина¹, Е.Е. Ломонова², П.А. Рябочкина¹, Е.И. Черноз³ ¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск ² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ³ Научно-производственное предприятие «ЭКОН», Обнинск АНАЛИЗ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА КЕРАМИКИ ZrO_2-Y_2O_3 МЕТОДОМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
12:30–14:00	ПЕРЕРЫВ

14:00–16:30	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ
	<p style="text-align: center;">СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 3 НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ <i>Председатель: д.ф.-м.н., проф. РАН А.В. Родина</i></p>
1	<p>Б.Р. Бородин (Приглашенный доклад) ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТРУКТУР НАНОФОТОНИКИ</p>
2	<p>Р.Н. Крюков, Б.Н. Звонков, В.П. Лесников, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, А.В. Кудрин, С.Ю. Зубков, Д.Е. Николичев, М.В. Ведь Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Mn НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЕВ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА GaMnAs</p>
3	<p>Г.О. Силаев¹, Ф.В. Верещагин¹, А.Т. Шайдулин², Ю.В. Орловский², Ю.Г. Вайнер¹ ¹Институт спектроскопии РАН, Москва ²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ LaF₃, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ БИМЕДИЦИНЫ</p>
4	<p>А.С. Перепелица, С.В. Асланов Воронежский государственный университет, Воронеж КОЛЛОИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ PbS ДЛЯ ДЕКОРИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ TiO₂ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ФОТОКАТАЛИЗА</p>
5	<p>Д.Э. Якобсон¹, М.Н. Жарков¹, В.П. Агеев¹, В.И. Шляпкина¹, О.А. Куликов¹, Г.Б. Сухоруков², Н.А. Пятаев¹ ¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ²Лондонский университет королевы Марии, Лондон, Великобритания ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОСОВМЕСТИМЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА IN VIVO</p>
6	<p>Р.А. Анисимов¹, М.В. Ломова¹, В.И. Кочубей¹, И.Ю. Янина^{1,2} ¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов ²Томский национальный исследовательский государственный университет, Томск СИСТЕМЫ ЯДРО-ОБОЛОЧКА ДЛЯ ДОСТАВКИ НАНОЧАСТИЦЫ В ЖИВЫХ ОБЪЕКТАХ</p>
7	<p>С.В. Гущин¹, С.В. Кузнецов², А.А. Ляпин¹, В.Ю. Пройдакова², П.А. Рябочкина¹, П.П. Федоров² ¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск ² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ХАРАКТЕРИСТИКИ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ФТОРИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ SrF₂:Ho И SrF₂:Ho, Yb ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ УРОВНЯ ⁵I₇ ИОНОВ Ho³⁺</p>
17:30–18:30	КУЛЬТУРНАЯ ПРОГРАММА (ОБЗОРНАЯ ЭКСКУРСИЯ ПО ГОРОДУ)

23 сентября 2022, пятница

9:00–11:15	ЛЕКЦИИ Председатель: д.ф.-м.н., проф. Н.С. Аверкиев	
9:00–9:45	<u>М.В. Рахлин</u> ¹ , А.И. Галимов, Г.В. Климко, С.В. Сорокин, Д.Р. Казанов, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, А.А. Торопов ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ И КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	
9:45–10:30	<u>И.С. Азанова</u> ПАО ПНПК, г. Пермь РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН	
10:30–11:15	<u>Г.Е. Малашкевич</u> ¹ , В.В. Ковзар ¹ , П.П. Першукевич ¹ , И.В. Станишевский ² , Н.В. Голубев ³ , М.З. Зиятдинова ³ , Е.С. Игнатьева ³ , В.Н. Сигаев ³ ¹ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск ² Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск ³ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ $B_2O_3-AL_2O_3-(Y_{1-x}Yb_x)_2O_3 + CR_2O_3 + M_2O$	
11:15–11:30	ПЕРЕРЫВ	
11:30–13:00	ЗАСЕДАНИЯ СЕКЦИЙ	
	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 2 ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ Председатель: д.ф.-м.н, проф. П.А. Рябочкина	СЕКЦИОННЫЙ ЗАЛ № 3 ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА Председатель: к.ф.-м.н., доцент К.Н. Нищев
1	<u>С.А. Артемов</u> , А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, С.В. Костин, А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, <u>А.Д. Таратынова</u> , С.А. Хрущалина Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВЛК ВАРИКОЗНЫХ ВЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ	<u>А.П. Вельмузов</u> , М.В. Суханов, Д.А. Плехович, И.И. Евдокимов Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН, Нижний Новгород ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТЫХ СТЕКЛО СИСТЕМ Ga-Ge-Te-I И Ge-Te-AgI ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

2	<p><u>С.А. Хрущалина, И.А. Юрлов, П.А. Рябочкина, В.П. Агеев, О.А. Куликов, В.И. Шляпкина, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, С.В. Костин</u> Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p>УСИЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ</p>	<p><u>Ю.А. Лаптева^{1,2}, И.С. Азанова^{1,2}, И.О. Молчанов^{1,2}</u> ¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь ²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь</p> <p>ВОДОРОДОСТОЙКОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ И ТЕМПЕРАТУРЕ</p>
3	<p><u>Д.В. Поминова^{1,2}, В.Ю. Пройдакова¹, И.Д. Романишкин¹, А.В. Рябова^{1,2}</u> ¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва ²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ НАНОЧАСТИЦАМИ $\text{NaGdF}_4:\text{Yb}^{3+}-\text{Er}^{3+}$ @ NaYF_4 И ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОМ</p>	<p><u>А.И. Лобанов¹, М.С. Копьева^{2,3}, С.А. Филатова³, А.И. Трикшеев³, Я.Э. Садовникова¹, В.А. Камынин³, Н.Р. Арутюнян³, Е.Д. Образцова³</u> ¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва ²Российский университет дружбы народов «РУДН», Москва ³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва</p> <p>РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ НАСЫЩЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ</p>
4		<p><u>Е.А. Тюрина, А.П. Вельмузов</u> Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, Нижний Новгород</p> <p>ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ОСОБО ЧИСТЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМ $\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ и $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-15$ ат.%) ДЛЯ ИК ОПТИКИ</p>

5	<p><u>А.Д. Шевцова</u>^{1,2}, <u>В.Д. Степанова</u>^{1,3}, <u>Ю.О. Шаронова</u>¹, <u>И.С. Азанова</u>^{1,2,3}, <u>А.С. Вахрушев</u>¹</p> <p>¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь ²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь ³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь</p> <p>ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА</p>
6	<p><u>А.А. Южакова</u>, <u>Д.Д. Салимгареев</u>, <u>А.Е. Львов</u>, <u>П.В. Пестерева</u>, <u>В.М. Кондрашин</u>, <u>А.С. Корсаков</u>, <u>Л.В. Жукова</u></p> <p>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург</p> <p>МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБА НА ПЕРЕДАЧУ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СВЕТОВОДАМИ</p>
7	<p><u>А.А. Пыненков</u>, <u>К.Н. Нищев</u>, <u>В.П. Матюшкина</u></p> <p>Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В НАТРИЕВОБОРОСИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ С ДОБАВКОЙ ОКСИДА ГЕРМАНИЯ МЕТОДОМ ДИЛАТОМЕТРИИ</p>
13:00–15:00	ПЕРЕРЫВ
15:00	ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ. ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ И УСИЛИТЕЛИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

С.В. Фирстов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН, Москва
E-mail: fir@fo.gpi.ru

Висмутовые волоконные световоды являются лазерными средами, обладающими широкими полосами усиления в ближнем ИК диапазоне, что позволяет их использовать для создания одномодовых устройств генерации и усиления света. В световодах такого типа происходит формирование висмутовых активных центров (ВАЦ), оптические свойства которых зависят от химического состава и структурных особенностей стеклянной матрицы [1]. Физическая природа таких центров до сих пор не раскрыта, несмотря на накопленный объем экспериментальных данных. Тем не менее, подробные исследования оптических свойств различных типов световодов позволили провести классификацию ВАЦ и определить их взаимосвязь с наблюдаемыми полосами поглощения и люминесценции. К настоящему времени установлено существование 4 типов ВАЦ, структура и свойства которых определяются ионом-модификатором или сеткообразователем, а именно, ВАЦ, ассоциированный с Al, P, Si и Ge. Обзорная информация о свойствах ВАЦ показана на рисунке 1. Следует подчеркнуть, что на излучательных переходах именно таких ВАЦ достигнута лазерная генерация в различных участках спектра ближней ИК области, которые представляют несомненный практический интерес.

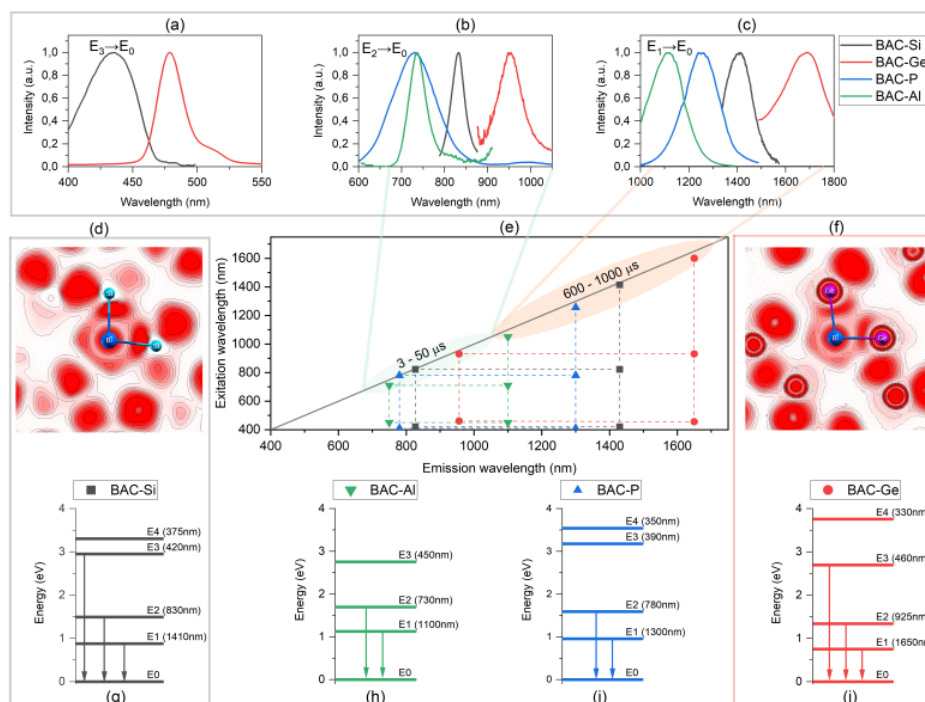


Рис. 1. Основные характеристики ВАЦ: основные полосы люминесценции (a, b, c), взаимное расположение основных пиков люминесценции и соответствующие им времена жизни люминесценции (e); конфигурации энергетических уровней ВАЦ (g, h, i, j); возможная структура ВАЦ-Si и ВАЦ-Ge, полученная из расчета (d, f) [2].

В данной работе будут рассмотрены основные актуальные научные направления, касающиеся разработки волоконных лазеров и усилителей на основе висмутовых световодов, которые можно сформулировать следующим образом:

- I. Изучение влияния условий тепловой пост-обработки и режимов вытяжки висмутовых световодов на их лазерные и усилительные свойства.
- II. Разработка компактных и эффективных усилителей для различных телекоммуникационных диапазонов (O-, E-, S- и U-полос).
- III. Расширение рабочей полосы волоконно-оптических усилителей путем использования активных сред с несколькими типами ВАЦ или комбинацией эрбиевых световодов с висмутовыми световодами.
- IV. Разработка висмутовых лазеров и усилителей с накачкой в оболочку.

Направление I успешно развивается применительно к световодам с ВАЦ-Ge, концентрация которых начинает возрастать после тепловой обработки при относительно невысоких температурах (до 600 °С) за счет дополнительного формирования ВАЦ. Комплексные научные исследования в данном направлении позволили определить оптимальные условия термообработки и достичь определенных улучшений с точки зрения количества ВАЦ-Ge и эффективности получаемых лазеров, излучающих в области 1.6 – 1.8 мкм [3]. Установлено, что изменением скорости вытяжки можно управлять оптическими свойствами получаемых световодов, повышая КПД создаваемых лазеров [4, 5]. Определены основные параметры процессов формирования ВАЦ и предложены механизмы реакций, лежащих в основе таких процессов. Помимо ИЦВО РАН, в данном направлении проводятся интенсивные исследования зарубежными коллегами, которые используют другие разновидности висмутовых световодов (например, [6]).

Направление II безусловно имеет важное прикладное значение. Тем не менее, для достижения поставленных задач требуется решение ряда научных проблем. Так, например, для получения компактного и эффективного устройства необходим устойчивый к макроизгибам одномодовый волоконный световод с уменьшенным размером сердцевины, что позволит достичь более высоких плотностей мощности накачки. Для реализации такого световода необходимо повышение Δn (разница в показателях преломления стекла сердцевины и оболочки), чтобы сохранить одномодовое распространение света. Увеличение n стекла сердцевины, как правило, сопровождается изменением химического состава стекла, что существенно влияет на формирование ВАЦ. Недавно был предложен и реализован подход, ориентированный на модификацию химического состава стекла оболочки вокруг активной сердцевины. Таким образом, впервые был реализован висмутовый световод с W-образным профилем показателя преломления, полученным в результате формирования вокруг сердцевины фторсодержащего кольцевого слоя (депрессированного слоя) из кварцевого стекла с пониженным показателем

преломления (до -0.01 по отношению к n чистого кварцевого стекла) (рис. 2(а)). Установлено, что неконтролируемая диффузия элементов из прилегающих к висмутсодержащей сердцевине областей не оказывает заметного влияния на оптические свойства и условия формирования ВАЦ. Благодаря такому подходу удалось создать висмутовый световод одновременно с заданными оптическими свойствами и являющийся нечувствительным к радиусам изгиба до 1.5 см (рис. 2(б)) [7]. На рис. 2(в, г) показан прототип компактного оптического модуля висмутового волоконного усилителя для О-диапазона и его основные характеристики, соответственно [8]. Видно, что приемлемые для практического использования характеристики, а именно, усиление > 20 дБ и шум-фактор ~ 5 - 6 дБ можно достичь при мощности накачки ~ 250 мВт. Полученные результаты превосходят существующие мировые аналоги, позволяя существенно снизить стоимость конечного устройства, что будет крайне важно при их коммерциализации.

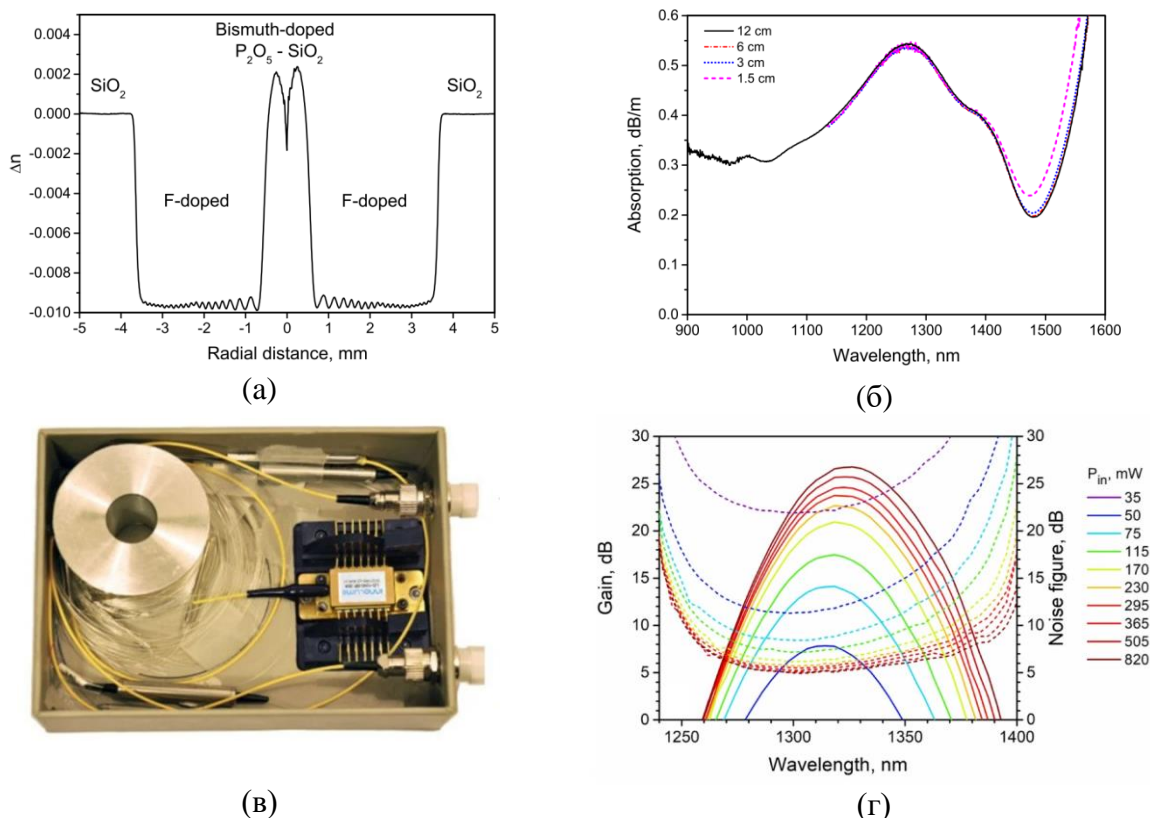


Рис. 2. (а) – W-образный профиль показателя преломления преформы висмутового световода; (б) – спектры оптических потерь висмутового световода с W-образным профилем показателя преломления для различных радиусов изгиба; (в) – прототип оптического модуля висмутового волоконного усилителя для О-диапазона; (г) – спектры усиления слабого сигнала (сплошные линии) и шум-фактора (штриховые линии) висмутового усилителя.

Следует также отметить, освоение с помощью висмутовых усилителей данного спектрального диапазона крайне интересно для телекоммуникационных компаний. Недавно компания OFS Fitel продемонстрировала первый коммерческий висмутовый усилитель для О-диапазона [9].

Безусловно, что существует интерес не только к висмутовым усилителям для О-диапазона, но также и для других спектральных областей. Это продиктовано существующими задачами, например, с помощью применения висмутового усилителя мощности в области 1.65 – 1.73 мкм могут решаться проблемы, касающиеся повышения чувствительности систем регистрации газов в атмосфере [10] и т.д.

Переходя к *направлению III*, следует отметить, что существенный прогресс достигнут благодаря использованию висмутовых световодов с W-образным профилем показателя преломления. Было экспериментально продемонстрировано, что такой дизайн позволяет осуществлять плавное управление оптическими свойствами получаемых световодов путем вариации химического состава стекла сердцевин световодов в достаточно широких пределах, как показано на рис. 3 для концентрации фосфора. Важно подчеркнуть, что в таком случае возможности по изменению концентрации легирующих добавок существенно выше, чем для типичных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления. Видно, что присутствие фосфора ожидаемо приводит к появлению полосы усиления вблизи 1.33 мкм, ассоциированную с ВАЦ-Р. Плавное уменьшение концентрации фосфора в сердцевине световода приводит к появлению плеча, а затем и явной полосы ВАЦ-Si в области 1.43 мкм. При оптимальном соотношении ВАЦ-Р и ВАЦ-Si в результате сильного взаимного перекрытия полос можно добиться широкого спектра усиления [11] (рис. 3).

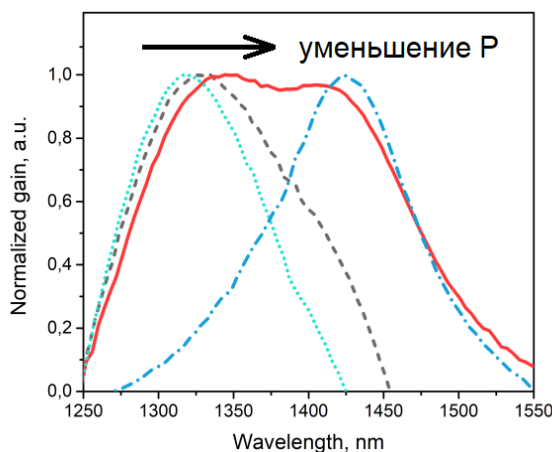


Рис. 3. Спектры оптического усиления висмутовых световодов с депрессированной оболочкой при изменении концентрации фосфора в сердцевине световода.

В последнее время для создания широкополосного усилителя стали применяться также комбинированные схемы, включающие эрбиевый и висмутовый световоды. Наиболее успешные результаты были достигнуты компанией Huawei Technologies (с использованием висмутовых световодов, разработанных в ИЦВО РАН), которые опубликованы в работе [12].

Последнее направление (*Направление IV*) является совершенно новым, в котором прогресс был достигнут только в начале текущего года,

когда вышла первая публикация по висмутовым лазерам с накачкой в оболочку [13]. Важность полученных результатов заключается в ряде аспектов: упрощение конструкции висмутовых лазеров, снижение их стоимости, улучшенные возможности по масштабированию выходных параметров устройств и др.

В заключении следует отметить, что висмутовые световоды стали объектом пристального внимания со стороны коммерческих телекоммуникационных компаний, как ключевой элемент для создания волоконных усилителей, которые способны работать во всем спектральном диапазоне, где существует реальная возможность для передачи информации по оптическим системам связи. В данном обзоре рассмотрены основные направления, в которых, в последнее время, достигнут прогресс, усиливая интерес к устройствам на основе висмутовых световодов. Важно отметить, что коммерциализация устройств на висмутовых световодах вполне перспективна, учитывая тот факт, что практические испытания таких устройств активно проводятся как в лабораторных условиях, так и в реальных волоконно-оптических системах связи.

Данная работа была частично поддержана Российским Научным Фондом (грант 22-19-00708).

1. E. Dianov, *Light Sci. Appl.* **1**, e12 (2012).
2. A.M. Khagai et al, *J. Non-Cryst. Solids* (submitted) (2022)
3. A.V. Kharakhordin et al, *Appl. Phys. B* **126**, 87 (2020).
4. S. Firstov et al, *Photon. Technol. Lett.* **32**, 913 (2020).
5. A. Khagai et al, *J. Lightwave Technol.* **38**, 6114 (2020).
6. Q. Zhao et al, *Opt. Lett.* **45**, 1152 (2020).
7. S. Firstov et al, *Opt. Lett.* **45**, 2576 (2020).
8. S.V. Firstov et al, *Sci. Rep.* **10**, 11347 (2020).
9. V. Mikhailov et al, *Proc. SPIE*, **12027**, 120270B (2022).
10. H. Panu et al, *Meas. Sci. Technol.* **32**, 055206 (2021).
11. Y. Ososkov et al, *Opt. Express* **29**, 44138 (2021).
12. F. Maes et al, *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, p. Th4C.8 (2022).
13. S. Firstov et al, *Opt. Lett.* **47**, 778 (2022).

ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМ Ga-Ge-Te-I И Ge-Te-AgI ДЛЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА

А.П. Вельмузов, И.И. Евдокимов, Д.А. Плехович, М.В. Суханов
*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,
Нижний Новгород*

E-mail: velmuzhov.ichps@mail.ru

Перспективным направлением современного оптического материаловедения является разработка материалов, прозрачных в спектральном диапазоне 2-15 мкм. Такие материалы в форме окон, линз и волоконных световодов используются в устройствах систем безопасности военных летательных аппаратов, приборах ночного видеонаблюдения, высокочувствительных анализаторах и датчиках для обнаружения токсичных, наркотических, взрывчатых веществ, осуществления непрерывного контроля промышленных процессов, мониторинга окружающей среды и др. Существует ограниченное число материалов, прозрачных в спектральной области 2-15 мкм, из которых могут быть изготовлены волоконные световоды. К одним из таких материалов относятся халькогенидные стекла систем Ga-Ge-Te-I и Ge-Te-AgI. Важнейшей характеристикой этих стекол является содержание примеси кислорода в форме оксидов германия, галлия и теллура. Эта примесь существенно ухудшает прозрачность стекол, поэтому задача ее эффективного снижения является актуальной.

Целью работы было разработать способы получения стекол систем Ga-Ge-Te-I и Ge-Te-AgI заданного химического состава с низким содержанием примеси кислорода. Предлагаемые способы включали следующие основные этапы: 1) синтез и вакуумную загрузку теллурида германия(II) в реактор с шихтой пропусканием паров теллура над германием; 2) синтез и вакуумную загрузку теллурида галлия(III) и йодида серебра методом химических транспортных реакций с использованием йодида галлия(III) и йодида германия(IV) в качестве транспортирующих агентов.

Проведено термодинамическое моделирование указанных этапов синтеза стекол, позволившее оценить их эффективность для очистки компонентов шихты и оптимальные условия экспериментального оформления. Получены образцы особо чистых стекол $Ga_{10}Ge_{15}Te_{75}$, $Ga_{10}Ge_{15}Te_{73}I_2$ и $(GeTe_4)_{90}(AgI)_{10}$. Отклонения составов от заданного значения, согласно результатам атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, не превышали 0.5 ат.%. Содержание примеси кислорода в форме оксидов германия, галлия и теллура в стеклах достигнуто на уровне 1 ppb(wt). Этот результат является лучшим для стекол на основе теллуридов германия и галлия. Определены оптимальные условия вытяжки волоконных световодов из полученных образцов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-73-10104).

ВОДОРОДОСТОЙКОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ И ТЕМПЕРАТУРЕ

И.С. Азанова^{1,2}, Ю.А. Лаптева^{1,2}, И.О. Молчанов^{1,2}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь
E-mail: LaptevaYA@pnppk.ru

В работе проведены испытания волокна оптического одномодового температуростойкого радиационностойкого водородостойкого [1] (далее – ВОО-ТРВС) в среде с высокой концентрацией водорода и давлением 93 атм. Температура среды изменялась от 100 °С до 300 °С. Измерены механические характеристики ВОО-ТРВС до и после испытаний. Получена температура, при которой наблюдается интенсивный рост оптических потерь и нарушение герметичности углеродного слоя (рис.1).

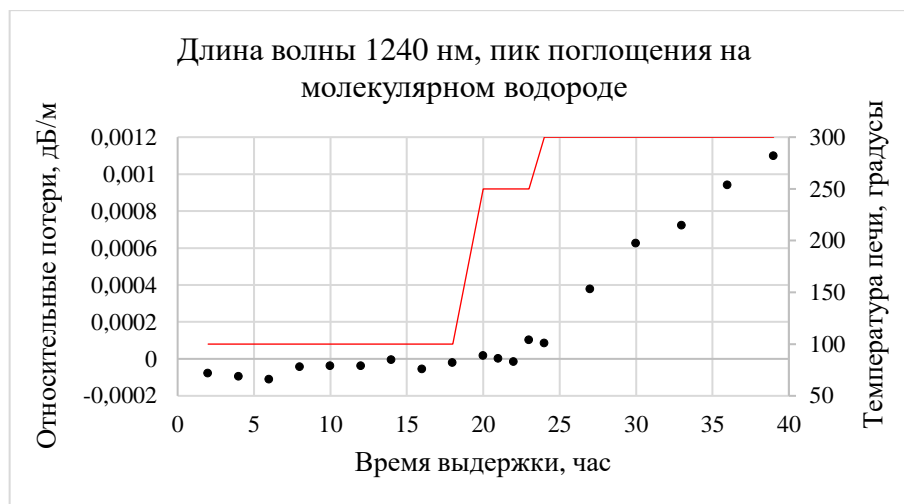


Рис. 1. График роста относительных потерь с течением времени и изменением температуры

На графике видно, что при температуре 100 °С оптические потери стабилизированы. При температуре 250 °С наблюдается постепенный рост на 0.1 дБ/км после 4 часов выдержки. После увеличения температуры до 300 °С начинается интенсивный рост оптических потерь со скоростью 0.07 дБ/км в час.

Предельная прочность до испытаний составляла 5.11 ГПа, после испытаний 5.04 ГПа, отклонение прочности находится в пределах погрешности измерений. Внешний вид покрытия после испытаний не изменился. Дефектов, трещин и участков деградации покрытия не выявлено. В высококонцентрированной водородной среде под давлением 93 атм, водород постепенно проникает в сердцевину оптического волокна при повышении температуры до 250 °С и выше.

1. И.С. Азанова и др., Фотоника **13**, 444 (2019).

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИКИ НАСЫЩЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

Н.Р. Арутюнян¹, В.А. Камынин¹, М.С. Копьева^{1,2}, А.И. Лобанов³,
Е.Д. Образцова¹, Я.Э. Садовникова³, А.И. Трикшев¹, С.А. Филатова¹

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

²Российский университет дружбы народов «РУДН», Москва

³МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

E-mail: senya7062@gmail.com

Интерес к изучению динамики насыщения поглощения оптических затворов обусловлен их активным использованием в качестве насыщающихся поглотителей лазеров для реализации режимов синхронизации мод или модуляции добротности [1, 2]. В последнее время продемонстрировано множество насыщающихся поглотителей, обладающих различными характеристиками, что усложняет задачу измерения их оптических свойств. Поэтому универсальный стенд для измерения насыщения поглощения, в котором можно учесть особенности материала, поможет облегчить и ускорить процесс измерений.

На рис. 1 представлена принципиальная схема стенда, в основе которой лежит импульсный лазер и акустооптический модулятор (АОМ). АОМ формирует пачки импульсов с заданной формой огибающей. Это необходимо для контроля термического воздействия на образцы насыщающихся поглотителей, в качестве которых использовались одностенные углеродные нанотрубки в полимере. Снижение влияния термических эффектов в результате импульсного воздействия позволяет не повредить нанотрубки и отсеять возможность получения некорректных результатов измерения динамики насыщения поглощения.

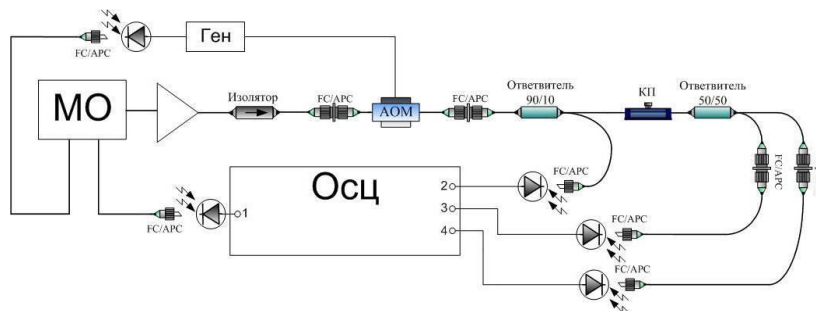


Рис. 1. Схема стенда.

Произведено сравнение с аналогичной схемой для измерения насыщения поглощения с аттенуатором вместо АОМ. Продемонстрировано измерение кривых насыщения поглощения в автоматическом режиме.

Образцы ОУНТ изготовлены при поддержке гранта РФФИ № 20-42-08004.

1. T. Jiang et al., *Photonics Research* **1(8)**, (2020).
2. C. Ma et al., *Applied Physics Reviews* **4(6)**, (2019).

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ОСОБО ЧИСТЫХ СТЕКОЛ СИСТЕМ
 $\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ и $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-15$ ат.%) ДЛЯ ИК ОПТИКИ

А.П. Вельмузов, Е.А. Тюрина

*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,
Нижний Новгород*

E-mail: tyurina@ihps-nnov.ru

Стекла на основе сульфидов германия, галлия и сурьмы обладают выраженной способностью растворять редкоземельные элементы, что делает их перспективными материалами для источников излучения, усилителей и лазеров среднего ИК диапазона. Кристаллизационная устойчивость этих стекол позволяет изготавливать из них волоконные световоды для создания высокочувствительных оптических сенсоров. Отдельный интерес представляют стекла системы $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ обусловленный смещением длинноволнового края пропускания с 12 до 14 мкм, по сравнению со стеклами, содержащими сульфиды германия и мышьяка. Это расширяет возможности применения таких материалов в оптике среднего ИК диапазона.

Целью работы было исследовать физико-химические свойства, кристаллизационную устойчивость стекол системы $\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ и $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-15$ ат.%) и разработать методику их получения с низким содержанием примесей. Исследованы закономерности влияния химического состава стекол на их характеристические температуры и кристаллизационную устойчивость. Установлена природа и последовательность формирования кристаллических фаз при закалке расплава и отжиге стекол. Определены конкретные составы стекол, наиболее подходящие для вытяжки волоконных световодов: $\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-8$). Впервые установлена и количественно охарактеризована ликвация в этих стеклах. Определены условия закалки стеклообразующего расплава и отжига стекол, позволяющие получать образцы без кристаллических и ликвационных включений размером более 0.1 мкм.

Разработан способ получения стекол Ga-Ge-S и Ga-Sb-S, включающий: 1) синтез и загрузку в реактор сульфида германия(II) и сульфида сурьмы(III); 2) синтез сульфида галлия(III) взаимодействием йодида галлия(III) с серой. Получены образцы стекол с содержанием примеси водорода в форме SH-групп на уровне 0.1 ppm (at); гетерогенных включений микронного (1-100 мкм) и субмикронного (0.1-0.9 мкм) размера < 100 штук/см³. К настоящему времени это лучший результат, достигнутый для стекол указанных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках созданной лаборатории Высокочистых халькогенидных стекол для фотоники среднего ИК диапазона (гос. задание № 075-03-2021-412).

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЭРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

И.С. Азанова^{1,2,3}, А.С. Вахрушев¹, В.Д. Степанова^{1,3}, Ю.О. Шаронова¹,
А.Д. Шевцова^{1,2}

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

E-mail: ShevtsovaAD@pnppk.ru

Проведены исследования эрбиевого активного волокна RR-AE-980 в однопроходной (А) и двухпроходной (Б) конфигурациях суперлюминесцентных волоконных источников (СВИ) при воздействии непрерывного гамма-излучения. Показано, что радиационная стойкость активного оптического волокна зависит от конфигурации СВИ.

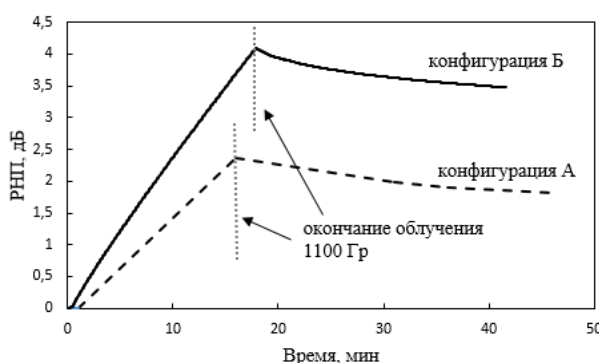


Рис. 1. Влияние конфигурации СВИ на величину РНП на длине волны 1550 нм.

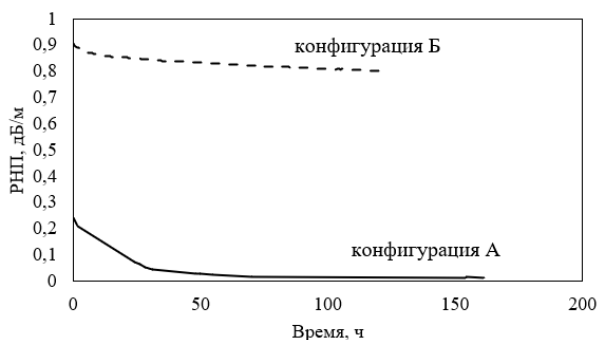


Рис. 2. Восстановление генерационных свойств активного волокна после облучения в пассивном режиме.

Однопроходный СВИ показывает меньшие радиационно-наведенные потери (рис. 1), в то время как двухпроходный СВИ демонстрирует высокую стабильность средневзвешенной длины волны при воздействии непрерывного гамма-излучения. Восстановление генерационных свойств активного волокна после облучения в пассивном режиме, т.е. без накачки, в различных конфигурациях СВИ при одинаковых условиях (мощность накачки 100 мВт и комнатная температура) происходит неодинаково. Начальная величина РНП в двухпроходной конфигурации значительно выше, и активное волокно практически не восстанавливается.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБА НА ПЕРЕДАЧУ ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СВЕТОВОДАМИ

Л.В. Жукова, В.М. Кондрашин, А.С. Корсаков, А.Е. Львов, П.В. Пестерева,
Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

E-mail: a.a.lashova@urfu.ru

Фотонно-кристаллические световоды (ФКС) представляют собой новый класс пассивных волоконно-оптических элементов и открывают новые возможности управления излучением: высокую селективность или генерацию суперконтинуума, одномодовый режим работы с увеличенным диаметром поля моды, передача энергии высокой мощности и прочее.

Актуальной задачей оптики и фотоники является создание ФКС для инфракрасного диапазона 2-27 мкм, что возможно путем разработки световодов на основе кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и таллия (I). Данные материалы являются пластичными, негигроскопичными, прозрачными в диапазоне 0.4 – 60.0 мкм и 0.05 – 30.0 ТГц, устойчивыми к ионизирующим излучениям.

На основе галогенидов серебра и таллия (I) были разработаны ФКС с твердотельной сердцевиной и центральной вставкой из оптически более плотного материала, чем материал матрицы [1, 2]. Оценка их функциональных свойств, таких как распределение интенсивности в дальнем поле, влияние изгиба на поле фундаментальной моды, могут быть исследованы с помощью метода конечных элементов, реализованного в ПО Comsol Multiphysics [3].

Моделирование изгиба световода выполнялось при одном полном витке радиуса R . По результатам моделирования изгиба была получена высокая устойчивость к изгибу ФКС с центральной вставкой с критическим радиусом изгиба 0.056 м, что подтверждает его высокие функциональные свойства.

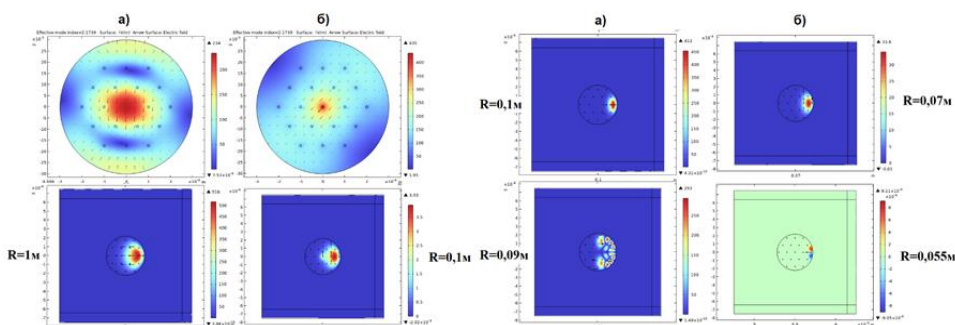


Рис. 1. Изгиб ФКС: (а) с твердотельной сердцевиной, (б) с центральной вставкой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10108.

1. A. Yuzhakova et al., Opt. Mat. **121**, 111642 (2021).
2. A.S. Korsakova et al., J. Opt. Tech. **88**, 8 (2021).
3. Comsol Multiphysics V. 6, COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В НАТРИЕВОБОРОСИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ С ДОБАВКОЙ ОКСИДА ГЕРМАНИЯ МЕТОДОМ ДИЛАТОМЕТРИИ

А.А. Пыненков, К.Н. Нищев, В.П. Матюшкина

*Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

E-mail: alekspyn@yandex.ru

Натриевоборосиликатная система наиболее подробно изучена с точки зрения получения на ее основе пористых стекол [1]. Система $\text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{GeO}_2$ и пористые материалы, изготовленные на ее основе, представляет интерес для использования в технологии производства оптических волокон с высокой концентрацией иона-активатора. Наличие же германия в составе пористого стекла интересно в связи с повышением показателя преломления конечного активированного материала, а также с исследованием его влияния на формирование активных центров, в частности активных висмутовых центров (АВЦ).

В докладе приведены результаты исследования влияния термообработки и концентрации оксида германия на формирование двухфазной структуры в системе $(70-x) \text{SiO}_2 - 23 \text{B}_2\text{O}_3 - 7 \text{Na}_2\text{O} - x \text{GeO}_2$, где $x = 0, 3, 5$ мол. %.

Исходные образцы стекла были синтезированы методом плавления твердофазной шихты в платиновых тиглях при температуре 1430°C в течение 2-х часов с постоянным перемешиванием кварцевой мешалкой.

Проведена закалка образцов при 750°C в течение 10 минут для гомогенизации стекла, а также долговременный отжиг при температурах $550, 600$ и 650°C .

Оценка формирования в стекле двухфазной структуры проводилась по изменению разницы между значениями температуры размягчения ($T_{\text{н.д}}$) и температуры стеклования (T_g). Значения данных характеристических температур определялись методом дилатометрии при нагрузке 0.05 Н . Скорость нагрева составляла 3 К/мин .

По результатам исследований определены оптимальные условия термообработки для формирования двухфазной структуры в стеклах указанной системы.

1. О.В. Мазурин и др., *Двухфазные стекла: структура, свойства, применение*, Л.: Наука, 1991.

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СВЕТОВОДЕ С ДИСПЕРСИЕЙ КАСКАДНО ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ДЛИНЫ

И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенов

*Научно-Исследовательский Технологический Институт им. С.П. Капицы
Ульяновского Государственного Университета, Ульяновск*

E-mail: lva2013@yandex.ru

Модуляционная неустойчивость (МН) – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Динамика излучения описывается уравнением вида [1, 2]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + i\gamma |A|^2 A = 0 \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр ДГС, γ – параметр нелинейности, ДГС:

$$d_2(z) = d_{20} \cdot \begin{cases} 1, & z < z_0 \\ f(z), & z \geq z_0 \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 1 приводятся зависимости максимума слабомодулированной волны вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)]. \quad (3)$$

Для параметров: начальной мощности $P_0 = 1$ Вт, начальной ДГС $d_{20} = -10^{-26}$ с²/м, ДГС на выходе из световода $d_2(L)/d_{20} = 0.1$, параметре нелинейности $\gamma = 10^{-2}$ (Вт·м)⁻¹, частоте модуляции $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\gamma P_0 / |d_{20}|}$.

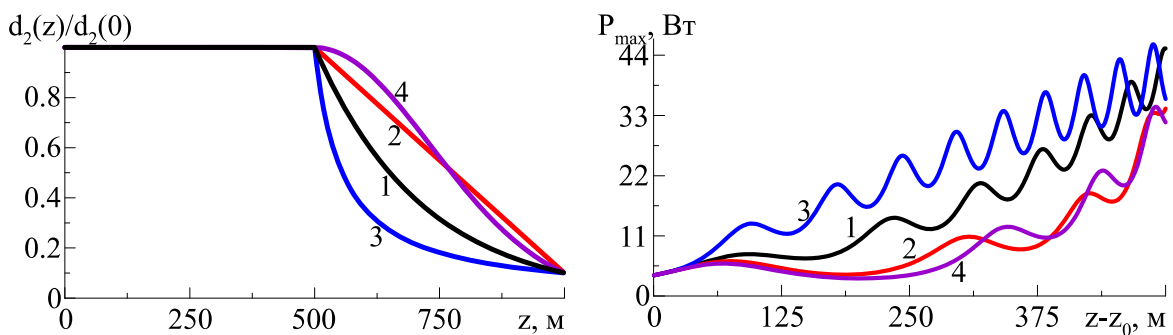


Рис. 1. Нормированные продольные зависимости дисперсии (слева) и максимума модулированной волны (справа) $f(z) = \exp(-b_e z); (1 - b_l z); (1 + b_h z)^{-1}; \exp(-b_g z^2)$ – кривые (1; 2; 3; 4).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-42-730013.

1. G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Boston: Academic Press, 2007.
2. I.O. Zolotovskii, et al., *Opt. Commun.* **426**, 333 (2018).

ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСИЛИТЕЛЯХ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

И.О. Золотовский, В.А. Лапин, Д.И. Семенцов

*Научно-Исследовательский Технологический Институт им. С.П. Капицы
Ульяновского Государственного Университета, Ульяновск*

E-mail: lva2013@yandex.ru

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = i\beta m \cos[\Omega(\tau - \delta\tau)]A + gA \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности.

На рис. 1 приводятся зависимости огибающей (*a*) и мгновенной частоты (*b*) на выходе из световода длиной $L = 500$ м гауссового импульса:

$$A(\tau, z = 0) = \sqrt{P_0} \exp(-\tau^2 / 2\tau_0^2), \quad (2)$$

полученные путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. Для: начальной длительности $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощности $P_0 = 10$ Вт (0), ДГС $d_2 = -10^{-26}$ с²/м, нелинейности $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹ – (1-3), усилении среды $g(\omega) = g_0 \left[1 + (\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega_L^2 \right]^{-1}$, $g_0 \approx 10^{-2}$ м⁻¹, $\Delta\omega_L = 10^{11}$ с⁻¹. Видно, что в среде с БВПИ импульс может быть усиливаться, сохраняя свою форму, при ширине линии усиления $\Delta\omega_L = 10^{11}$ с⁻¹, приобретая практически линейный чирп, что обеспечивает возможность его дальнейшего эффективного сжатия на дифракционной решетке.

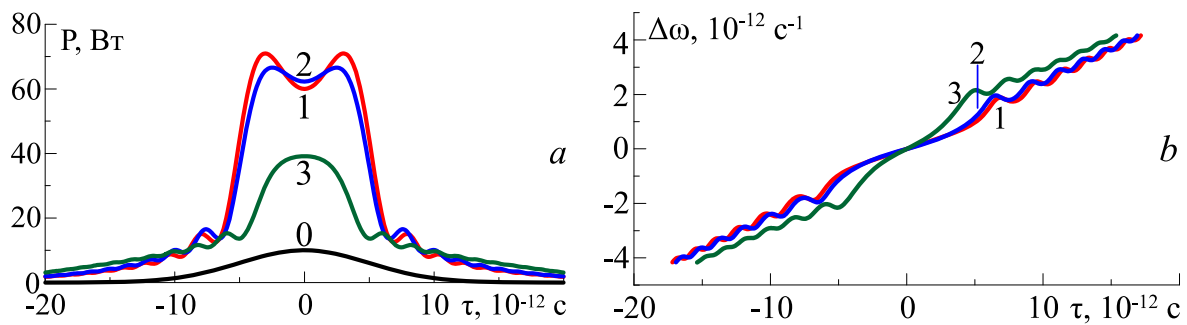


Рис. 1. Динамика огибающей (*a*) и мгновенной частоты (*b*) импульса на выходе из световода с БВПИ при $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹ – (1-3).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-42-730013.

1. В.П. Торчигин, Квантовая электроника **31**, 1089 (2001).
2. И.О. Золотовский и др., Квантовая электроника **51**, 293 (2021).

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ОПРЕДЕЛЁННУЮ МЕТОДОМ ДВУХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА

Е.А. Поспелова^{1,2,3}, А.Н. Смирнова¹

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь

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

³Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН, Москва

E-mail: ANSmirnova@pnppk.ru

В литературе наблюдается противоречивая информация о влиянии ионизирующего излучения (ИИ) на механические параметры оптического волокна (ОВ) в акрилатном покрытии [1, 2].

Было изготовлено одномодовое радиационно-стойкое ОВ в акрилатном покрытии, подготовлено 6 свободных намоток длиной 100 м и диаметром 170 мкм каждая. Каждая намотка ОВ была подвержена γ -облучению на аттестованной γ -облучающей установке ГУТ 200 М с активным источником ^{60}Co . Мощность дозы была постоянной 3.5 Гр/с. Накопленная доза γ -облучения составила: 50 кГр, 100 кГр, 186 кГр, 590 кГр, 850 кГр и 3000 кГр. Во время облучения контролировались оптические потери, вызванные ИИ. У исходного ОВ и у образцов после ИИ определялась предельная прочность методом двухточечного изгиба [3] (рис. 1). Под воздействием ИИ цвет акрилатного покрытия изменился с белого (исходное ОВ) до жёлтого (накопленная доза 3 МГр).

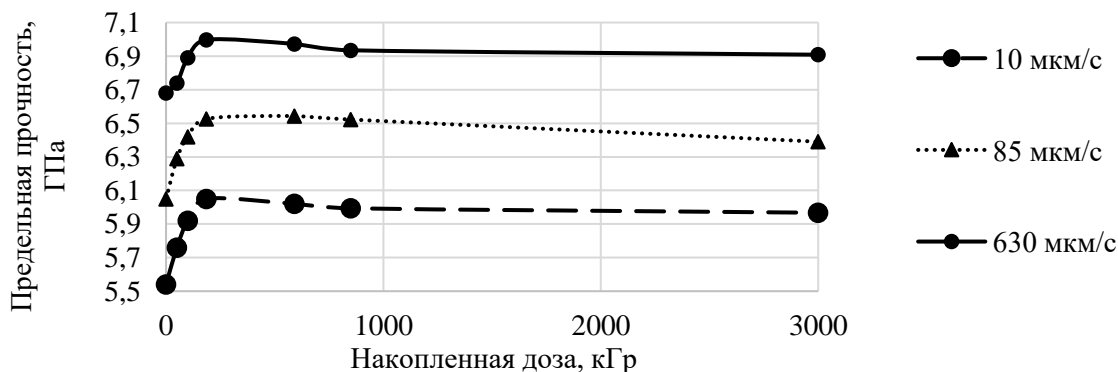


Рис. 1. Зависимость предельной прочности ОВ от накопленной дозы γ -облучения

Установлено, что предельная прочность ОВ после ИИ возросла по отношению к исходным значениям. При накопленных дозах γ -облучения до 186 кГр наблюдается максимальное упрочнение ОВ. Дальнейшее увеличение накопленной дозы γ -облучения приводит к снижению предельной прочности ОВ по сравнению с максимальной. Увеличение предельной прочности, вероятно, вызвано радиационным упрочнением кварца [4].

1. M.V. Uffelena et al., Proc. of SPIE **6193**, 619303-1 (2006).
2. G. Mélin et al., IEEE Transactions on Nuclear Science **66**, 1657 (2018).
3. ГОСТ Р МЭК 60793-1-33-2014.
4. В.А. Степанов, П.В. Деменков, О.В. Никулина, Физика в ядерной энергетике **2021-1**, 143 (2021).

FIBER OPTICS

BISMUTH-DOPED FIBER LASERS AND AMPLIFIERS: CURRENT STATE AND PROSPECTS

S.V. Firstov

Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

Dianov Fiber Optics Research Center of RAS, Moscow, Russia

E-mail: fir@fo.gpi.ru

Bismuth-doped fibers are active media exhibiting wide gain bands in near IR that allows one to use these fibers for development of single-mode lasers and amplifiers. This type of the fibers is characterized by the formation of bismuth active centers (BACs) with the optical properties varying on the chemical composition and structural features of glass matrix [1]. The physical nature of the BACs has not yet been revealed, despite the accumulated amount of experimental data obtained. Nevertheless, energy level diagram of BACs and their relationship with the observed absorption and luminescence bands were determined using detailed study of the optical properties of various types of Bi-doped fibers. To date, it was revealed four types of BACs (BACs associated with Al, P, Si, and Ge), whose the optical transitions are defined by the modifier ion or network former of glass matrix. An overview of the BACs features is shown in fig. 1. It should be emphasized that light amplification and laser oscillation achieving in the practically valuable IR bands is provided by the radiative transitions of the mentioned above BACs.

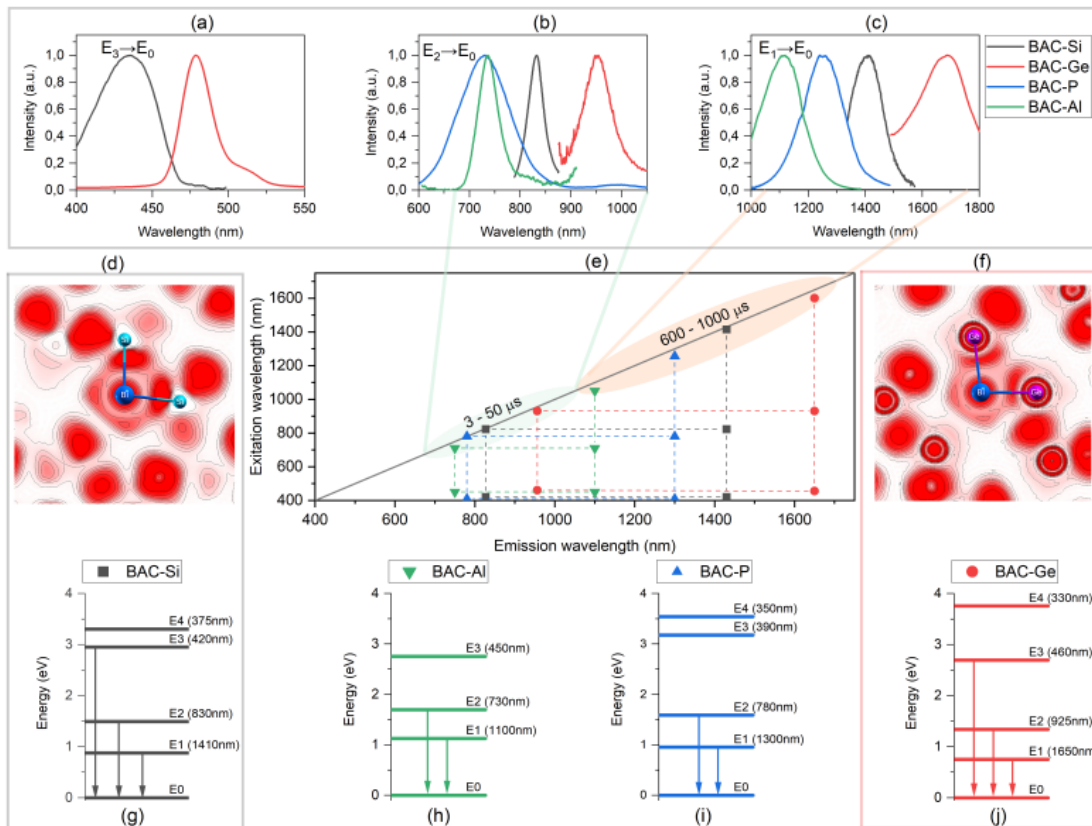


Fig. 1. Basic characteristics of BACs: main luminescence bands (a, b, c), mutual arrangement of main luminescence peaks and corresponding luminescence lifetimes (e); energy level configurations of BACs (g, h, i, j); possible structure of BAC-Si and BAC-Ge derived from calculation (d, f) [2].

This paper reviews the main current scientific directions related to the development of fiber lasers and amplifiers based on the bismuth-doped fibers, which can be formulated as follows:

I. Study of the effect of thermal post-processing conditions and drawing regimes of bismuth-doped fibers on their laser and gain properties.

II. Development of compact and efficient amplifiers for various telecommunication bands (O-, E-, S- and U-bands).

III. Extending the operating bandwidth of fiber-optic amplifiers by using active media with different types of BACs or a combination of erbium- and bismuth-doped fibers.

IV. Development of cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers and amplifiers.

Direction I is successfully developed in relation with fibers containing BACs-Ge. The concentration BACs-Ge can be increased by heat treatment at relatively low temperatures (up to 600 °C) due to formation of additional BACs. Comprehensive research in this direction provided relevant information on the optimal conditions for heat treatment, the achieved certain improvements in terms of the amount of BAC-Ge and the efficiency of the developed lasers operating in the region of 1.6 – 1.8 μm [3]. It was established that by changing the drawing speed it is possible to manage the optical properties of the fibers, achieving an increase in the efficiency of the obtained lasers [4, 5]. The main parameters of the BACs formation process were measured and the mechanisms of the reactions underlying such processes were proposed. Except FORC RAS, intensive research in this direction is being carried out by foreign colleagues for other types of bismuth-doped fibers (for instance, [6]).

Direction II is of great practical importance. However, in order to achieve these goals, a number of scientific problems have to be solved. For example, to obtain a compact and efficient device, a macrobending-resistant single-mode optical fiber with a reduced core size is required, which will make it possible to achieve higher pump power densities. To implement such a fiber, it is necessary to increase Δn (difference in the refractive indices of the glass core and cladding) in order to maintain single-mode light propagation. An increase in n of the core glass is usually accompanied by a change in the chemical composition of the glass, which significantly affects the formation of BACs. Recently, an approach on the modification of the chemical composition of the cladding glass around the active core was proposed. For the first time, a bismuth-doped fiber with a W-type refractive index profile was fabricated. This design was obtained as a result of the formation of a fluorine-containing (depressed) annular layer of silica glass around the core with a refractive index of up to - 0.01 with respect to n of pure silica glass (fig. 2(a)). It was found that the uncontrolled diffusion of chemical elements from the regions adjacent to the bismuth-containing core does not noticeably affect the optical properties and conditions of the formation of BACs. Due to this approach, it was possible to create a bismuth fiber simultaneously with the specified optical properties and being insensitive to bending radius of 1.5 cm (fig. 2(b)) [7]. Fig. 2(c, d) shows a prototype of a

compact optical module of a bismuth-doped fiber amplifier for the O-band and its main characteristics, respectively [8]. It can be seen that the obtained characteristics, namely a gain of > 20 dB and a noise factor of ~ 5 – 6 dB achieved at a pump power of ~ 250 mW, are acceptable for practical use. The results obtained are better than those of existing world analogues, providing a significant reduction in the cost of a final device, which will be extremely important for further commercialization.

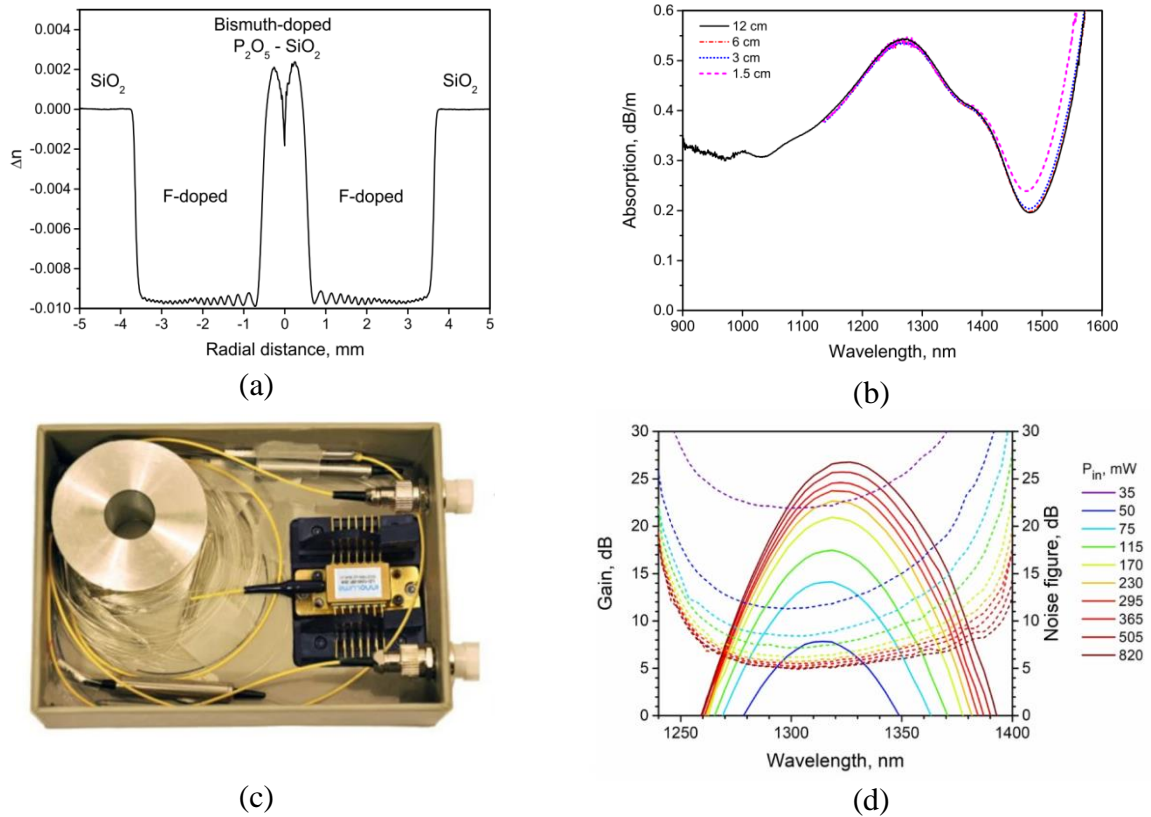


Fig. 2. (a) – W-type refractive index profile of Bi-doped fiber preform; (b) – optical loss spectra of Bi-doped fiber measured at different bending radius; (c) – the prototype of optical module of bismuth-doped fiber amplifier for the O-band; (d) – small-signal gain (solid) and noise-figure (dashed) spectra of the bismuth-doped fiber amplifier.

It should also be noted that the development of bismuth-doped fiber amplifiers in this spectral range is extremely interesting for telecom companies. Recently, OFS Fitel demonstrated the first commercial O-band bismuth-doped fiber amplifier [9].

In addition, there is interest not only in bismuth-doped amplifiers for the O-band, but also in other spectral regions. This is dictated by existing tasks, for example, use of a high-power bismuth-doped amplifier in the region of $1.65 - 1.73 \mu\text{m}$, can solve the problems regarding an increase of the sensitivity of gas detection systems in the atmosphere [10] etc.

As concerns *Direction III*, it should be noted that significant progress there was achieved due to W-type bismuth-doped fibers also. It was experimentally demonstrated that such a design allows providing management of the optical properties of the obtained fibers by varying the chemical composition of the fiber core glass over a relatively wide range, as shown in

fig. 3. It is important to emphasize that in this case, the possibilities for changing the dopant concentration are significantly higher than for fibers with a step-index profile. It can be seen that the presence of phosphorus, as expected, leads to the appearance of a gain band near 1.33 μm associated with BAC-P.

A monotonic decrease of the phosphorus concentration in the fiber core results to the appearance of a shoulder and then a distinctive BAC-Si band in the region of 1.43 μm . At an optimal ratio between BACs-P and BACs-Si, a wide gain spectrum can be achieved because of a strong mutual overlap of the corresponding bands [11] (fig. 3).

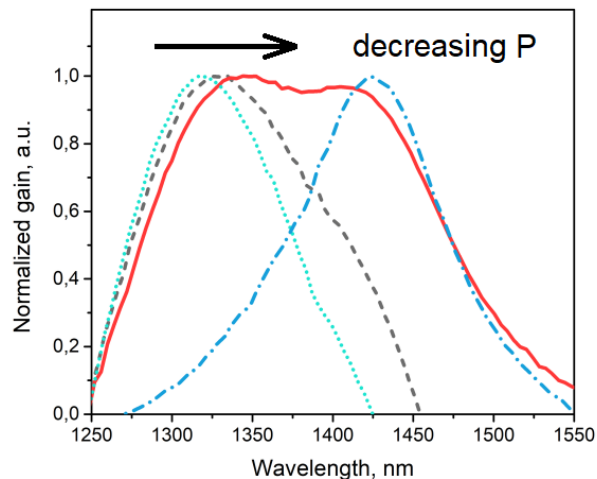


Fig. 3. Optical gain spectra of W-type Bi-doped fibers at variation of P content in active glass core.

Recently, configurations based on erbium- and bismuth-doped fibers were also used to create a broadband amplifier. The most successful results published in [12] were achieved by Huawei Technologies (using bismuth-doped fibers developed at FORC RAS).

The last direction (*Direction IV*) is completely new, where the progress was achieved only at the beginning of this year after the first cladding-pumped bismuth-doped fiber lasers [13]. The importance of the obtained results is in following aspects: facilitation of the design of bismuth-doped fiber lasers, their cost effectiveness, improved possibilities for scaling the output parameters of devices, etc.

In conclusion, it should be noted that bismuth-doped fibers have become an object of close attention from commercial telecommunication companies because they are as a key element for creating fiber amplifiers capable of operating in the entire spectral range, where there is a real opportunity for data transmission via the optical communication systems. This paper reviews the main directions concerning optical devices based on bismuth-doped fibers where progress was recently obtained. It is important to note that the commercialization of bismuth-doped fiber devices is quite promising, given the fact that practical tests of such devices are actively carried out in laboratory experiments and real fiber-optic communication systems.

This research was partially supported by the Russian Science Foundation (22-19-00708).

1. E. Dianov, *Light Sci. Appl.* **1**, e12 (2012).
2. A.M. Khegai et al, *J. Non-Cryst. Solids* (submitted) (2022)
3. A.V. Kharakhordin et al, *Appl. Phys. B* **126**, 87 (2020).
4. S. Firstov et al, *Photon. Technol. Lett.* **32**, 913 (2020).
5. A. Khegai et al, *J. Lightwave Technol.* **38**, 6114 (2020).
6. Q. Zhao et al, *Opt. Lett.* **45**, 1152 (2020).
7. S. Firstov et al, *Opt. Lett.* **45**, 2576 (2020).
8. S.V. Firstov et al, *Sci. Rep.* **10**, 11347 (2020).
9. V. Mikhailov et al, *Proc. SPIE*, **12027**, 120270B (2022).
10. H. Panu et al, *Meas. Sci. Technol.* **32**, 055206 (2021).
11. Y. Ososkov et al, *Opt. Express* **29**, 44138 (2021).
12. F. Maes et al, *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, p. Th4C.8 (2022).
13. S. Firstov et al, *Opt. Lett.* **47**, 778 (2022).

PREPARATION OF HIGH-PURITY Ga-Ge-Te-I AND Ge-Te-AgI GLASSES FOR LWIR FIBER OPTICS

I.I. Evdokimov, D.A. Plekhovich, M.V. Sukhanov, A.P. Velmuzhov
Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,
Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: velmuzhov.ichps@mail.ru

A promising area of modern optical materials science is the development of materials that are transparent in the spectral range of 2-15 μm . Such materials in the form of windows, lenses and optical fibers are used in security systems for military aircraft, high-precision guidance to stationary and moving targets, night video surveillance, high-sensitive analyzers and sensors for the detection of toxic, narcotic, explosive substances, continuous monitoring of industrial processes, environment monitoring, etc. There is a limited number of materials that are transparent in the 2-15 μm spectral region, from which optical fiber can be made. One of such materials is chalcogenide glasses of Ga-Ge-Te-I and Ge-Te-AgI systems. The most important characteristic of these glasses is the content of oxygen impurities in the form of oxides of germanium, gallium and tellurium. This impurity significantly worsens the transparency of glasses, so the problem of its effective reduction is topical.

The aim of the work was to develop methods for preparation glasses of the Ga-Ge-Te-I and Ge-Te-AgI systems of a given chemical composition with a low content of oxygen impurities. The proposed methods included the following main stages: 1) synthesis and vacuum loading of germanium(II) telluride into a reactor with charge by passing tellurium vapor over germanium; 2) synthesis and vacuum loading of gallium(III) telluride and silver iodide by chemical transport reactions using gallium(III) iodide and germanium(IV) iodide as transport agents.

Thermodynamic modeling of the indicated stages of glass synthesis was carried out, which made it possible to evaluate their effectiveness for charge components purification and the optimal conditions for experimental design. Samples of high-purity glasses $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{15}\text{Te}_{75}$, $\text{Ga}_{10}\text{Ge}_{15}\text{Te}_{73}\text{I}_2$ and $(\text{GeTe}_4)_{90}(\text{AgI})_{10}$ have been prepared. According to the results of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, the compositions deviations from the given value did not exceed 0.5 at.%. The content of oxygen impurity in the form of oxides of germanium, gallium and tellurium in glasses was reached at the level of 1 ppb(wt). This result is the best for glasses based on germanium and gallium tellurides. The optimal conditions for drawing optical fibers from the obtained samples are determined.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-73-10104).

HYDROGEN RESISTANCE OF OPTICAL FIBER AT HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE

I.S. Azanova^{1,2}, Y.A. Lapteva^{1,2}, I.O. Molchanov^{1,2}

¹Perm State National Research University, Perm, Russia

²Perm Scientific and Production Instrument Company, Perm, Russia

E-mail: LaptevaYA@pnppk.ru

In this work, we tested a single-mode temperature-resistant, radiation-resistant, hydrogen-resistant optical fiber [1] (hereinafter, BOO-TRVS) in a medium with a high hydrogen concentration and a pressure of 93 atm. The medium temperature varied from 100 °C to 300 °C. The mechanical characteristics of VOO-TRVS were measured before and after testing. The temperature was obtained at which there is an intensive increase in optical losses and a violation of the tightness of the carbon layer (fig. 1).

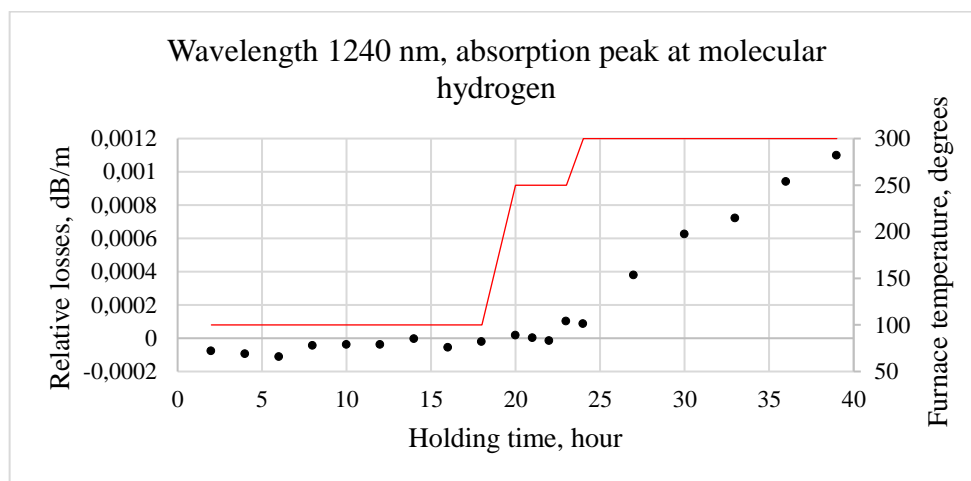


Fig.1. Graph of growth of relative losses over time and temperature change

The graph shows that at a temperature of 100 °C, the optical losses are stabilized. At a temperature of 250 °C, there is a gradual increase of 0.1 dB/km after 4 hours of exposure. After increasing the temperature to 300 °C, an intensive growth of optical losses begins at a rate of 0.07 dB/km per hour.

Ultimate strength before testing was 5.11 GPa, after testing 5.04 GPa, the strength deviation is within the measurement error. The appearance of the coating after testing has not changed. Defects, cracks and areas of degradation of the coating were not detected. In a highly concentrated hydrogen environment at a pressure of 93 atm, hydrogen gradually penetrates into the core of an optical fiber as the temperature rises to 250 °C and above.

1. I.S. Azanova et al., *Photonics* **13**, 444 (2019).

DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL OPTICAL STAND FOR MEASURING THE ABSORPTION SATURATION DYNAMICS OF OPTICAL ABSORBERS

H.R. Arutyunyan¹, S.A. Filatova¹, V.A. Kamynin¹, M.S. Kopyeva^{1,2},
A.I. Lobanov³, E.D. Obraztsova¹, Ya.E. Sadovnikova³, A.I. Trikshev¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia*

³*MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia*

E-mail: senya7062@gmail.com

Interest in researching the saturation absorption dynamics of optical gates is caused by their active use as saturable absorbers for lasers to realize mode locking or Q-switching modulation [1, 2]. Recently, many saturable absorbers with different characteristics have been demonstrated, which complicates the task of measuring their optical properties. Therefore, a universal absorption saturation measurement stand, in which the characteristics of a specific material can be taken into account, will help to make the measurement process simpler and quicker.

Figure 1 shows a schematic diagram of a stand which is based on a pulsed laser and an acousto-optic modulator (AOM). The AOM forms pulse packs with a defined envelope shape. This is necessary to control the thermal effects on the saturable absorber samples, for which single-walled carbon nanotubes in a polymer have been used. The reduction of the impact of thermal effects as a result of pulse exposure ensures not to damage the nanotubes and to avoid the possibility of getting incorrect results for measuring absorption saturation dynamics.

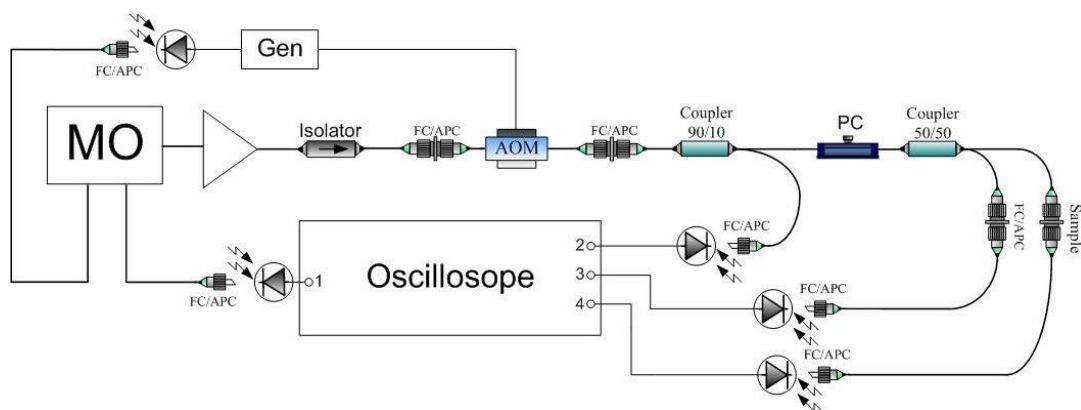


Fig. 1. Schematic of the stand.

A comparison is made with a similar setup for measuring saturation absorption with an attenuator instead of an AOM. Measurement of saturation absorption curves in automatic mode is demonstrated.

SWCNT samples were made with the support of the RSF grant 20-42-08004.

1. T. Jiang et al., *Photonics Research* **1(8)**, (2020).
2. C. Ma et al., *Applied Physics Reviews* **4(6)**, (2019).

PREPARATION AND PROPERTIES OF HIGH-PURITY GLASSES

$\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ и $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-15$ ат. %) FOR IR OPTICS

E.A. Tyurina, A.P. Velmuzhov

*Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,
Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: tyurina@ihps-nnov.ru

Glasses based on germanium, gallium, and antimony sulfides have a pronounced ability to dissolve rare-earth elements, which makes them promising materials for radiation sources, amplifiers and mid-IR lasers. The crystallization stability of these glasses makes it possible to fabricate optical fibers from them to create high-sensitive optical sensors. Glasses of the $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ system are of particular interest due to the shift of the long-wavelength transmission edge from 12 to 14 μm , compared with glasses containing germanium and arsenic sulfides. This expands the possibilities of using such materials in mid-IR optics.

The aim of the work was to investigate the physicochemical properties, crystallization stability of glasses of the $\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ and $\text{Ga}_x\text{Sb}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-15$ ат. %) systems and to develop a technique for their preparation with a low content of impurities. Regularities of the chemical composition influence on their characteristic temperatures and stability against crystallization are studied. The nature and sequence of the crystalline phases during melt quenching and glass annealing have been established. The specific glass compositions most suitable for fiber drawing were determined: $\text{Ga}_x\text{Ge}_{40-x}\text{S}_{60}$ ($x = 0-8$). Liquation in these glasses was established and quantitatively characterized for the first time. The conditions for glass-forming melt quenching and glasses annealing are determined, which make it possible to prepare samples without crystalline and liquation inclusions larger than 0.1 μm .

A method for Ga-Ge-S and Ga-Sb-S glasses preparation has been developed, including: 1) synthesis and loading of germanium(II) sulfide and antimony(III) sulfide into the reactor; 2) synthesis of gallium(III) sulfide by the interaction of gallium(III) iodide with sulfur. Glass samples with hydrogen impurity content in the form of SH-groups at the level of 0.1 ppm (at) were prepared; heterogeneous micron (1-100 μm) and submicron (0.1-0.9 μm) inclusions < 100 pieces/ cm^3 . To date, this is the best result achieved for the glasses of these systems.

This work was supported by the national project «Science and Universities» within the framework of the established Laboratory of high-purity chalcogenide glasses for mid-IR photonics. State task No 075-03-2021-412.

INFLUENCE OF THR CONFIGURATION OF SFS ON RADIATION RESISTANCE OF EDF

I.S. Azanova^{1,2,3}, Yu.O. Sharonova¹, A.D. Shevtsova^{1,2}, V.D. Stepanova^{1,3},
A.S. Vahrushev¹

¹Perm Scientific and Production Instrument Company, Perm, Russia

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

³Perm State National Research University, Perm, Russia

E-mail: ShevtsovaAD@pnppk.ru

Studies of the erbium-doped fiber (EDF) RR-AE-980 in single-pass (A) and double-pass (B) configurations of superfluorescent fiber sources (SFS) under the radiation have been carried out. It is shown that the radiation resistance of an active optical fiber depends on the configuration of the SFS.

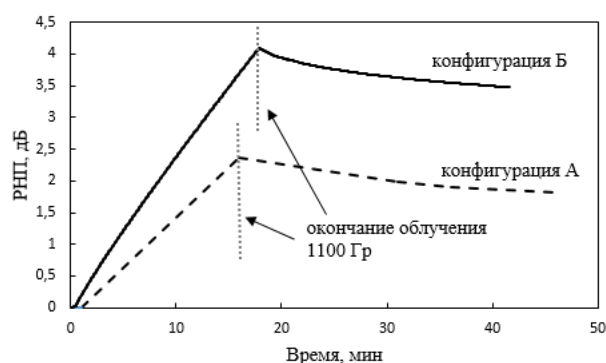


Fig. 1. Influence of the SFS configuration on the RIA @ 1550 nm.

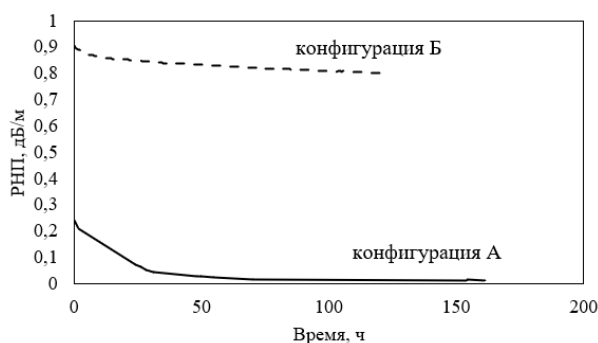


Fig. 2. Recovery of generation properties of an active fiber after irradiation in the passive mode.

Single-pass SFS shows lower radiation-induced attenuation (RIA) (fig. 1), while the double-pass SFS demonstrates high stability of the central wavelength under the radiation.

Recovery of generation properties of an active fiber after irradiation in the passive mode, that is, without pumping, in different SFS configurations under the same conditions (pump power 100 mW and room temperature) occurs differently. The initial value of RIA in the double-pass configuration SFS is much higher, and the active fiber is practically not restored.

SIMULATION OF BENDING INFLUENCE ON THE TRANSMISSION OF IR RADIATION BY PHOTON-CRYSTAL FIBERS

V.M. Kondrashin, A.S. Korsakov, A.E. Lvov, P.V. Pestereva,
D.D. Salimgareev, A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia*

E-mail: a.a.lashova@urfu.ru

Photonic crystal fibers (PCFs) represent a new class of passive optical elements and open up new possibilities for radiation control: frequency selectivity or supercontinuum generation, single-mode operation with an increased mode field diameter, high-power energy transmission, and others.

An urgent task of optics and photonics is the creation of a PCF for the infrared range of 2-27 μm , which is possible by developing optical fibers based on silver and thallium (I) halides crystals. These materials are flexible, non-hygroscopic, transparent in the range of 0.4 - 60.0 μm and 0.05 - 30.0 THz, resistant to ionizing radiation.

Based on silver and thallium (I) halides, PCFs with a solid core and a central insert made of an optically denser material than the matrix material were developed [1,2]. Their functional properties evaluation, such as the intensity distribution in the far field, the effect of bending on the fundamental mode field, can be studied using the finite element method implemented in the Comsol Multiphysics software [3].

The fiber bending was simulated with one complete turn of radius R . According to the bending simulation results, a high resistance to bending of the PCF with a central insert with a critical bending radius of 0.056 m was obtained, which confirms its high functional properties.

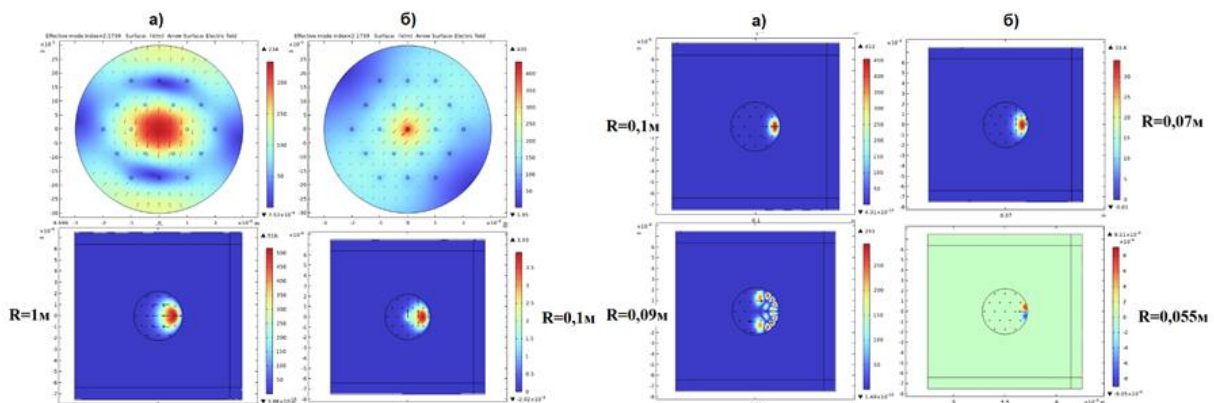


Fig. 1. Bending PCFs: (a) with a solid core, (b) with a central insert.

This work was supported by the Russian Science Foundation (No. 21-73-10108).

1. A. Yuzhakova et al., *Opt. Mat.* **121**, 111642 (2021).
2. A.S. Korsakova et al., *J. Opt. Tech.* **88**, 8 (2021).
3. Comsol Multiphysics V. 6, COMSOL AB, Stockholm, Sweden.

MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS PROPAGATED IN A FIBER WITH A CASCADE-DEPENDENT DISPERSION ON LENGTH

I.O. Zolotovskii, V.A. Lapin, D.I. Sementsov

*Kapitsa Research Institute of Technology of Ulyanovsk State University,
Ulyanovsk, Russia*

E-mail: lva2013@yandex.ru

Modulation instability (MI) is an effect characteristic of many nonlinear systems that support the propagation of localized waves, the nature of which is associated with the combined action of nonlinear and dispersion effects [1].

Radiation dynamics is described by an equation of the form [1, 2]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + i\gamma |A|^2 A = 0 \quad (1)$$

where $\tau = t - z/v_g$ – time in the running coordinate system, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – GVD parameter, γ – nonlinearity parameter, GVD:

$$d_2(z) = d_{20} \cdot \begin{cases} 1, & z < z_0 \\ f(z), & z \geq z_0 \end{cases} \quad (2)$$

On fig. 1 shows the dependences of the maximum of a weakly modulated wave of the form:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)]. \quad (3)$$

For the parameters: initial power $P_0 = 1$ W, initial GVD $d_{20} = -10^{-26}$ s²/m, GVD at the fiber output $d_2(L)/d_{20} = 0.1$, non-linearity parameter $\gamma = 10^{-2}$ (W·m)⁻¹, modulation frequency $\Omega_{\text{mod}} = \sqrt{2\gamma P_0 / |d_{20}|}$.

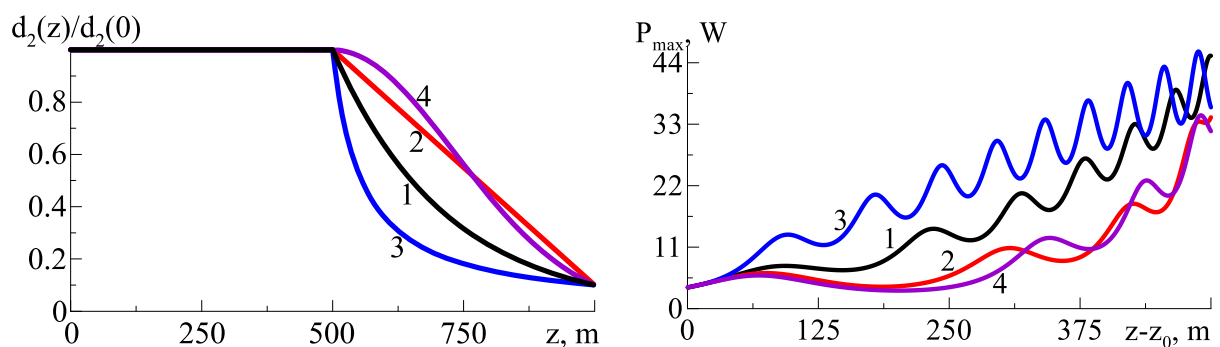


Fig. 1. Normalized longitudinal dependences of the dispersion (left) and the maximum of the modulated wave (right) $f(z) = \exp(-b_e z); (1 - b_l z); (1 + b_h z)^{-1}; \exp(-b_g z^2)$ - curves (1; 2; 3; 4).

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 19-42-730013.

1. G.P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Boston: Academic Press, 2007.
2. I.O. Zolotovskii, et al., *Opt. Commun.* **426**, 333 (2018).

GENERATION OF FREQUENCY-MODULATED WAVE PACKETS IN AMPLIFIERS WITH A TRAVELING WAVE OF REFRACTIVE INDEX

I.O. Zolotovskii, V.A. Lapin, D.I. Sementsov

*Kapitsa Research Institute of Technology of Ulyanovsk State University,
Ulyanovsk, Russia*

E-mail: lva2013@yandex.ru

The dynamics of the time envelope of the WP is described by the equation for the amplitude of the envelope of the form NLSE [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = i\beta m \cos[\Omega(\tau - \delta\tau)]A + gA \quad (1)$$

where $\tau = t - z/v_g$ – time in the running coordinate system, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – GVD parameter, γ – nonlinearity parameter.

On fig. 1 shows the dependences of the envelope (a) and instantaneous frequency (b) at the exit from the fiber with a length $L=500$ m of a Gaussian pulse:

$$A(\tau, z=0) = \sqrt{P_0} \exp(-\tau^2 / 2\tau_0^2) \quad (2)$$

obtained by numerical solution of equation (1) by the SSF method [1]. For: initial duration $\tau_0 = 10^{-11}$ c, power $P_0 = 10$ BT (0), GVD $d_2 = -10^{-26}$ c²/M, nonlinearity $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (BT·M)⁻¹ – (1-3), gain of the environment $g(\omega) = g_0 \left[1 + (\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega_L^2 \right]^{-1}$, $g_0 \approx 10^{-2}$ M⁻¹, $\Delta\omega_L = 10^{11}$ c⁻¹. It can be seen that, in a medium with a TRIW, a pulse can be amplified, retaining its shape, with an amplification line width of $\Delta\omega_L = 10^{11}$ s⁻¹, acquiring an almost linear chirp, which makes it possible to further effectively compress it on a diffraction grating.

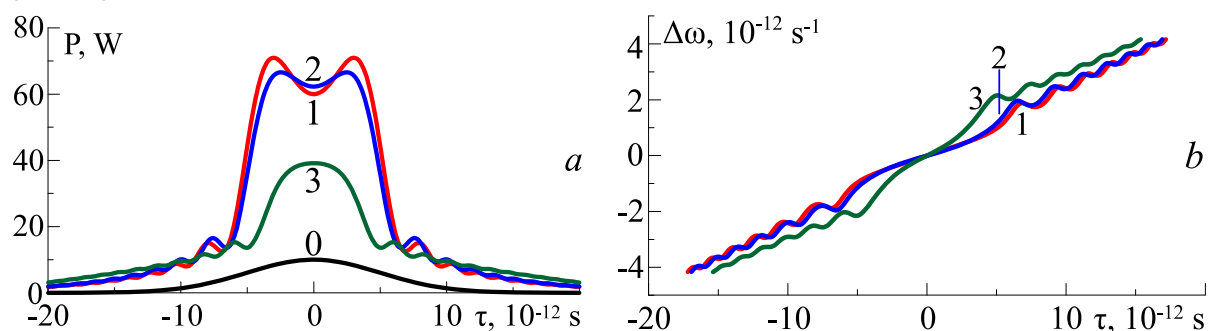


Fig. 1. Dynamics of the envelope (a) and instantaneous frequency (b) of the pulse at the output of the optical fiber with the BVPP at $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (W·m)⁻¹ – (1-3).

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project no. 19-42-730013.

1. V.P. Torchigin, Quantum Electronics **31**, 1089 (2001).
2. I.O. Zolotovskii et al., Quantum Electronics **51**, 293 (2021).

THE EFFECT OF IONIZING RADIATION ON THE STRENGTH OF OPTICAL FIBERS DETERMINED BY THE TWO-POINT BENDING TECHNIQUE

E.A. Pospelova^{1,2,3}, A.N. Smirnova¹

¹Perm Scientific and Production Instrument Company, Perm, Russia

²Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

³Dianov Fiber Optics Research Center of RAS, Moscow, Russia

E-mail: ANSmirnova@pnppk.ru

There is contradictory information in the literature about the effect of ionizing radiation (IR) on the mechanical parameters of the optical fiber (OF) in an acrylate coating [1, 2].

A single-mode radiation-resistant OF in an acrylate coating was manufactured. Six free windings with a length of 100 m and a diameter of 170 μm each were prepared. Each winding of the OF was exposed to IR on a certified γ -irradiating installation GUT 200 M with an active source of ^{60}Co . The dose rate was constant and amounted to 3.5 Gy/s. The accumulated doses of γ -radiation were 50 kGr, 100 kGr, 186 kGr, 590 kGr, 850 kGr and 3000 kGr. During irradiation, optical losses caused by IR were monitored. In the initial OF and in the samples after the IR, the ultimate strength was determined by the two-point bending technique (fig. 1) [3]. Under the influence of IR, the color of the acrylate coating changed from white (initial OF) to yellow (accumulated dose of 3 MGr).

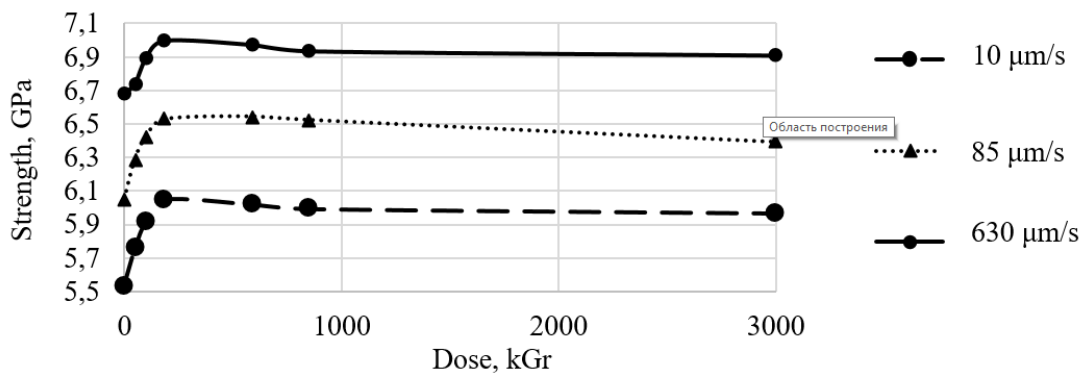


Fig. 1. Dependence of the ultimate strength of the S on the accumulated dose of γ -irradiation

It was found that the ultimate strength of the OF after IR increased in relation to the initial values. With accumulated doses of γ -irradiation up to 186 kGr, the maximum hardening of the OF is observed. A further increase in the accumulated dose of γ -radiation leads to a decrease in the ultimate strength of the OF compared to the maximum. The increase in strength is probably caused by radiation hardening of quartz [4].

1. M.V. Uffelena et al., Proc. of SPIE **6193**, 619303-1 (2006).
2. G. Mélin et al., IEEE Transactions on Nuclear Science **66**, 1657 (2018).
3. IEC 60793-1-33:2001.
4. V.A. Stepanov, P.V. Demenkov, O.V. Nikulina, Physics in Nuclear Power Engineering **2021-1**, 143 (2021).

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

ГАЗОФАЗНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ И СЕЛЕНИДОВ С ПОМОЩЬЮ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

В.В. Лисенков, В.В. Осипов, В.В. Платонов, Е.В. Тихонов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: platonov@iep.uran.ru

Рассматривается получение нанопорошков оксидов (Al_2O_3 , YSZ, $\text{Nd}(\text{Yb})\text{:Y}_2\text{O}_3$, TiO_2 , WO_3) и селенида цинка с помощью мощного лазера. Этот метод последовательно развивается в Институте электрофизики УрО РАН, начиная с 1998 года [1]. Он заключается в испарении мишени из спеченного микропорошка или смеси микропорошков соответствующего состава с помощью лазерного излучения и в образовании наночастиц при конденсации пара в потоке газа. Как и для другого газофазного метода, здесь характерно влияние параметров буферного газа на размеры и свойства получаемых наночастиц. При конденсации паров в газе образуются слабоагломерированные частицы малых размеров ($2 \div 80$ нм), что является преимуществом перед химическими способами получения наночастиц (типа осаждения из водного раствора), где синтезируемые наночастицы, как правило, сильно агломерированы. Отличие от других газофазных методов заключается в способе испарения вещества, которое в данном случае происходит под воздействием на мишень мощного непрерывного или квазинепрерывного лазерного излучения.

Полученные нанопорошки простых и сложных оксидов ($\text{Nd}/\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$, Al_2O_3 и т.п.) и $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ используются в ИЭФ УрО РАН для исследований создания керамических активных элементов твердотельных ИК лазеров. Из нанопорошков типа YSZ ($\text{Y}_2\text{O}_3:\text{ZrO}_2$) в ИЭФ УрО РАН изготавливают керамические твердые электролиты для топливных элементов (ТОТЭ).

Устройство установки для получения нанопорошков подробно описано в [2]. Для испарения мишеней нами используются непрерывный волоконный иттербиевый лазер ЛС-07Н ($\lambda = 1.065$ мкм, НТО «ИРЭ-Полус») с номинальной мощностью 700 Вт и импульсно-периодический CO_2 лазер ($\lambda = 10.6$ мкм) собственной разработки со средней мощностью излучения ≈ 500 Вт, длительностью и энергией импульса ≈ 330 мкс и ≈ 1 Дж, соответственно. Мишень устанавливается в испарительной камере. При получении нанопорошка она вращается и передвигается поступательно. Воздух в испарительную камеру подается с помощью наноса, а инертный газ подается из баллона. Продукты абляции вместе с газом сначала попадают в циклоны, где осаждаются большая часть осколков и капель расплава с размерами более нескольких микрометров. Далее по потоку расположен рукавный фильтр, в котором на поверхности фильтровального материала улавливается подавляющее число наночастиц. После дополнительной очистки газ выбрасывается в атмосферу.

Использование лазера с высокой средней мощностью излучения позволяет получать наночастицы с достаточно высокой производительностью, которая также зависит от свойств материала. При испарении CO_2 лазером в

воздухе атмосферного давления мишеней Fe_2O_3 , YSZ, $\text{Nd}(\text{Yb})\text{:Y}_2\text{O}_3$, WO_3 она составляет, соответственно, 7 г/час, 15-23 г/час, 30 г/час и 350 г/час.

Полученные с помощью лазера нанопорошки из тугоплавких оксидов содержат в себе слабоагломерированные наночастицы сферической и реже ограненной формы (рис. 1). Функция распределения наночастиц по размерам имеет логнормальный вид. Для наночастиц из различных оксидов, синтезированных в воздухе атмосферного давления, они фактически накладываются друг на друга, и средний размер частиц составляет $11 \div 20$ нм. Доля частиц крупной фракции (капель и осколков) в нанопорошке не превышает $0.3 \div 0.4$ вес. %.

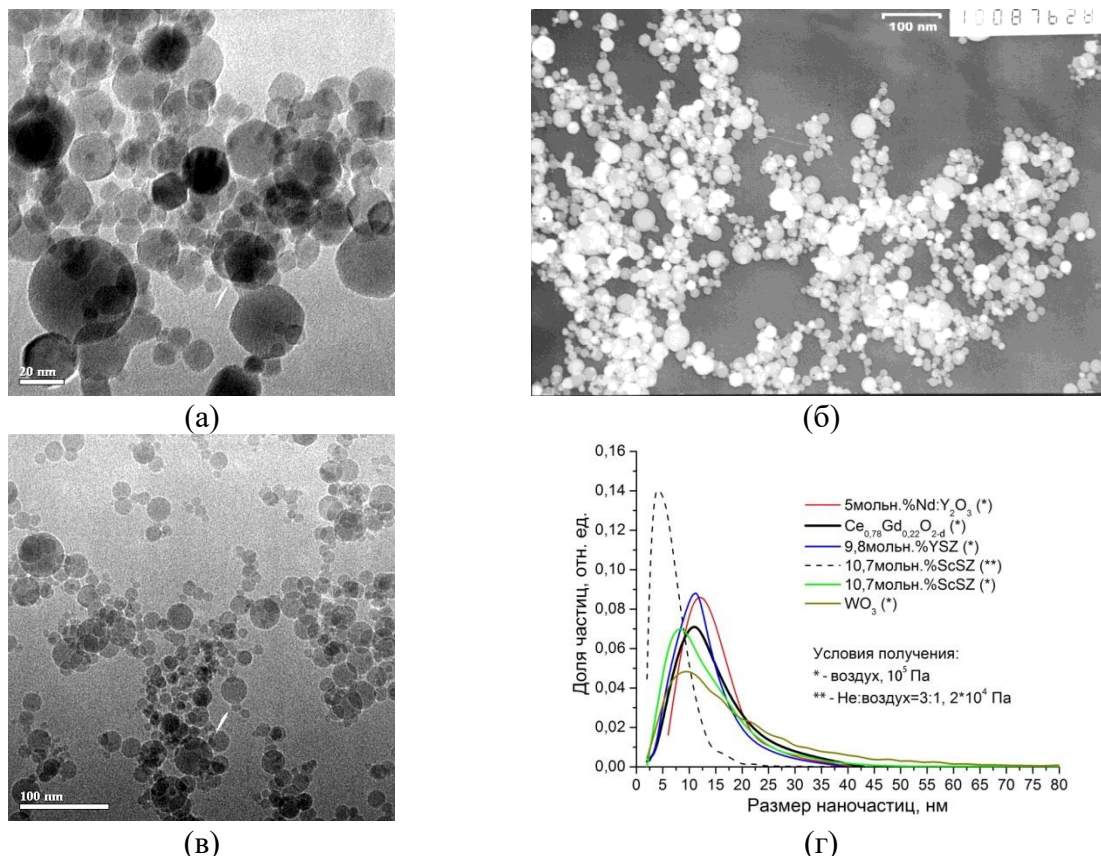


Рис. 1. Фотографии полученных с помощью CO_2 лазера наночастиц 10.8 мол.% ScSZ (а), YSZ ($\text{Y}_2\text{O}_3\text{:ZrO}_2$) (б), Al_2O_3 (в), а также распределения по размерам для наночастиц из разных оксидов (г). Буферный газ - воздух атмосферного давления.

Образующийся при испарении мишени лазерный факел распространяется в газ в виде яркосветящегося столба. При испарении тугоплавких оксидов вблизи мишени он представляет собой пар молекулярных радикалов типа YO , ZrO , AlO и т.п. По мере удаления от мишени пар охлаждается, и образуются наночастицы. Этот процесс сопровождается вихревым перемешиванием лазерного факела с буферным газом. Максимальный объём факела, концентрация и давление пара в нём зависят от сорта и давления буферного газа. В конечном счете, эти параметры влияют на средний размер наночастиц и во многом на производительность их получения. В частности, при испарении мишени из $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ с помощью CO_2 лазера увеличение давления воздуха с 100 кПа до 200 кПа привело к росту среднемассового размера наночастиц $d_{\text{ВЕТ}}$ с 21 нм

до 31 нм. Наночастицы из оксида иттрия с наименьшим размером (в этом цикле экспериментов) были получены в He ($d_{\text{ВЕТ}} = 16$ нм, $p = 150$ кПа), а наибольших размеров - в Ar ($d_{\text{ВЕТ}} = 43$ нм, $p = 250$ кПа). В тоже время при увеличении давления аргона с 150 кПа до 250 кПа производительность получения нанопорошка Nd:Y₂O₃ уменьшилась с 11 г/час до 2 г/час, а при давлении 400 кПа мишень совсем не испарялась.

Особенностью получения нанопорошков с помощью непрерывного волоконного иттербиевого лазера является высокая прозрачность многих оксидов, фторидов и селенидов (Y₂O₃, YSZ, Al₂O₃, TiO₂, CaF₂, ZnSe и т.п.) на длине волны $\lambda = 1.07$ мкм. Чтобы началось испарение мишени, интенсивность лазерного излучения в её поверхностном слое должна превысить порог оптического разрушения прозрачного материала. При типичной интенсивности сфокусированного излучения непрерывного иттербиевого лазера ($I \sim 1$ МВт/см²) оптическое разрушение высококачественных монокристаллов из этих материалов не происходит, и они не испаряются. Однако испарение возможно для пористых мишеней, спеченных из микропорошков ряда прозрачных диэлектриков. В пористых мишенях лазерное излучение рассеивается и распределяется очень неравномерно. В некоторых локальных местах оно концентрируется, где его интенсивность во много раз превышает интенсивность падающего излучения. Для ряда прозрачных материалов с коэффициентом преломления n более $1.7 \div 1.75$ (Y₂O₃, YSZ, Al₂O₃, TiO₂, ZnSe и т.п.) это позволяет превысить порог их оптического разрушения и получать нанопорошки.

Еще одной особенностью использования непрерывного иттербиевого лазера для получения нанопорошков оксидов и селенидов является большая по сравнению с импульсно-периодическим СО₂ лазером склонность к разбрызгиванию крупных капель расплава при испарении мишени. Это сильно снижает массовый выход нанопорошка при испарении одной мишени. Нужно сказать, что размеры капель расплава, разбрызгиваемых под действием излучения каждого из лазеров, заключены в одном и том же диапазоне ($0.5 \div 200$ мкм). Однако под действием непрерывного излучения волоконного лазера мощностью 600 Вт разбрызгивается особенно много капель крупнее 10 мкм, но именно эти капли составляют 99 % от массы всего разбрызганного расплава. Уменьшить разбрызгивание крупных капель удалось путем увеличения размеров фокусного пятна с 215 мкм до 430 мкм, увеличения линейной скорости перемещения пучка по мишени с 35 см/с до $60 \div 80$ см/с, а также за счет перехода к испарению мишени импульсами длительностью 120 мкс и скважностью 2. Эти меры позволили увеличить массовый выход нанопорошка Nd:Y₂O₃ с 10 % до 30 % от веса исходной мишени, т.е. до уровня, который реализуется в случае использования СО₂ лазера. В этом режиме производительность получения нанопорошков Nd:Y₂O₃, TiO₂ составила 15 г/час и 23 г/час, соответственно. Производительность получения нанопорошков ZnSe, Cu:ZnSe и Fe:ZnSe при этой же длительности импульсов и средней мощности лазерного излучения (300

Вт) оказалась намного выше (≈ 100 гр/час), поскольку селенид цинка начинает возгоняться при температуре уже 900 °С, что намного меньше температуры кипения $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ ($T_{\text{кип}} = 4300$ °С) и TiO_2 ($T_{\text{кип}} = 2972$ °С).

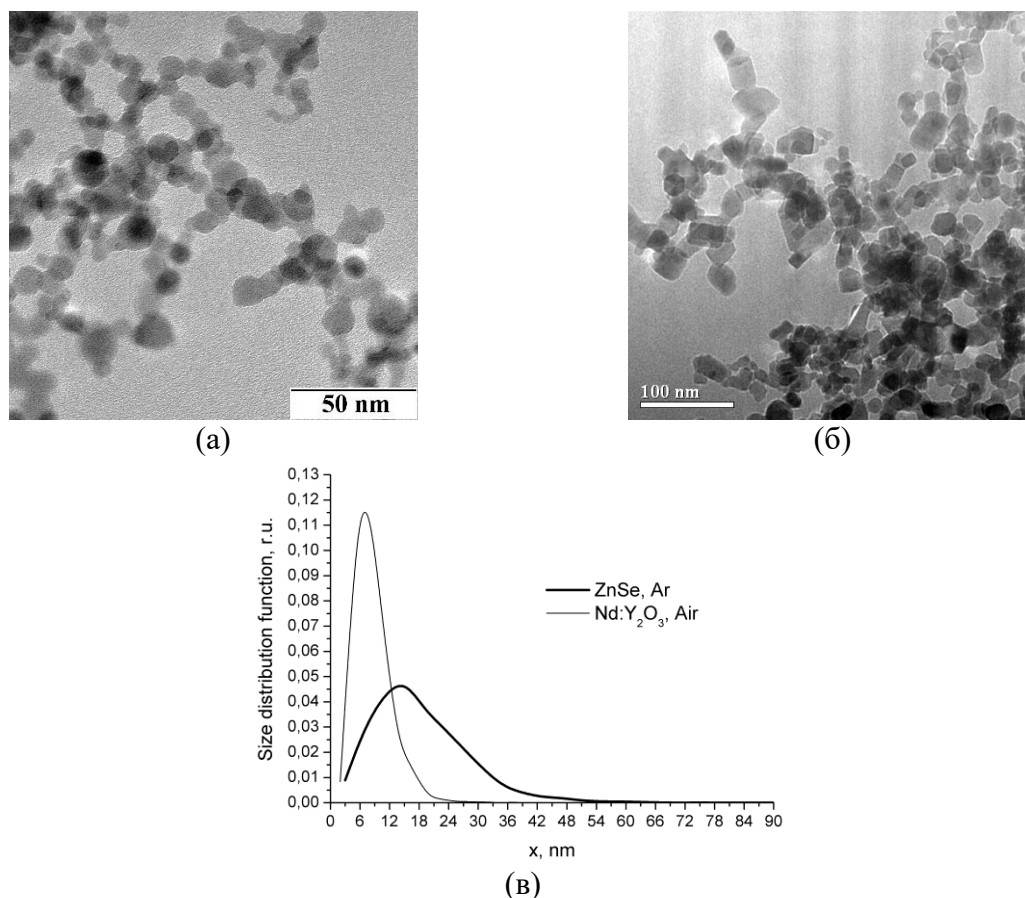


Рис. 2. Фотографии наночастиц $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ (а) и ZnSe (б), полученных с импульсно-периодического излучения волоконного иттербиевого лазера с пиковой мощностью импульсов 600 Вт и их длительностью 120 мкс, а также распределение этих наночастиц по размерам (в).

Полученные с помощью иттербиевого лазера нанопорошки $\text{Nd:Y}_2\text{O}_3$ и ZnSe имеют слабую агломерацию, но форма и средние размеры содержащихся в них частиц несколько различаются. Наночастицы оксида иттрия имеют сферическую форму, их средний арифметический размер составляет 8 нм. В тоже время, средний размер наночастиц ZnSe , имеющих форму многогранников, оказался почти в 2 раза больше (18 нм). Эта разница размеров, очевидно, связана с различиями теплофизических свойств этих материалов. Это ещё раз говорит о газофазной сущности лазерного метода получения наночастиц. Однако детали физических процессов, протекающих при образовании наночастиц в лазерном факеле, изучены ещё недостаточно хорошо.

Исследование выполнено в Институте электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург) за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20039.

1. В.В. Осипов и др., Известия Российской академии наук. Серия физическая **63**, 1968 (1999).
2. В.В. Осипов и др., Физика и химия обработки материалов №5, 5 (2021).

ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ СИСТЕМ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ И КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

А.И. Галимов, Ю.М. Задиранов, Д.Р. Казанов, Г.В. Климко,
М.М. Кулагина, М.В. Рахлин, С.В. Сорокин, А.А. Торопов
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: maximrakhlin@mail.ru

В последние десятилетия большое внимание было уделено разработке источников квантового света, таких как однофотонные излучатели с неклассической статистикой фотонов и источников запутанных пар одиночных фотонов. Эти устройства являются ключевыми элементами систем квантовой криптографии и квантовых вычислений. Самоорганизованные одиночные квантовые точки (КТ) выращенные эпитаксиальными методами (обычно методом молекулярно-пучковой эпитаксии), являются перспективными кандидатами для создания источников одиночных фотонов. В настоящее время уже существуют коммерчески доступные источники одиночных фотонов на основе КТ InAs/GaAs, излучающие вблизи длины волны 925 нм, и обладающие большой чистотой однофотонного излучения, высокой степенью неразличимости и яркостью. Однако эффективные однофотонные источники на основе КТ для видимого и телекоммуникационного диапазонов практически отсутствуют.

Для решения данных задач нами были разработаны технология изготовления источников одиночных фотонов на основе КТ, помещенных в фотонные нанополости, для систем (Al,Ga, In)As (Cd, Mg, Zn)(S,Se). Реализованы однофотонные источники, работающие в диапазоне 500-700 нм, что соответствует окну в области прозрачности атмосферы, а также максимуму квантовой эффективности лавинных однофотонных детекторов. При этом продемонстрировано яркое однофотонное излучение, в том числе и при температуре 220 К [1]. Для оптоволоконного О-диапазона (1300 нм) благодаря оптимизации активной области и дизайна исследуемой гетероструктуры позволили реализовать источники одиночных фотонов со средней скоростью излучения более 10^7 фотонов в секунду и корреляционной функцией второго порядка $g^{(2)}(0) = 0.18$ при температуре 8 К [2].

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (контракт No. 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021 и контракт No. R2152 от 19.11.2021).

1. M.V. Rakhlin et al., *Nanomaterials* **11**, 916 (2021).
2. M.V. Rakhlin et al., *Nanomaterials* **12**, 1562 (2022).

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ ЛИТОГРАФИЯ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТРУКТУР НАНОФОТОНИКИ

Б.Р. Бородин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: brborodin@gmail.com

В настоящий момент слоистые полупроводники являются одними из наиболее интенсивно исследуемых материалов. Это объясняется набором уникальных свойств интересных не только для фундаментальной физики, но и для приборных применений. В качестве примера таких свойств можно привести аномально высокое поглощение света [1] и огромную энергию связи экситонов [2]. Однако одним из главных препятствий на пути реализации нанопотонных структур на их основе является высокая чувствительность к разным поверхностным адсорбатам [3]. Кроме того, некоторые перспективные материалы, такие, как например InSe, чувствительны к воздействию кислорода и влажной среды [4]. В связи с этим, большое внимание уделяется методам безрезистивной литографии. Одним из таких методов является зондовая литография [5]. В данной работе мы демонстрируем применение механической фрикционной зондовой литографии к дихалькогенидам переходных металлов для создания структур нанопотоники.

Эксперимент производился на приборе Ntegra Aura (NT-MDT) с использованием Si и DCP (NT-MDT) зондов с диаметром острия 10-100 нм и жесткость 3-85 Н/м. Тонкие слои, полученные микромеханическим расслоением, переносились на Si-подложку, покрытую 50 нм золота.

Таким образом, в работе было продемонстрировано применение метода фрикционной зондовой литографии для создания нанопотонных резонаторов из слоистых материалов. В ходе исследования были сформированы нанопотонные резонаторы на модах шепчущей галереи диаметром от 1.4 до 10 мкм, толщиной 80 нм, и с добротностью около 100. Результаты работы позволяют рассматривать фрикционную зондовую литографию, как один из эффективных методов формирования фотонных устройств на основе слоистых материалов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-20049, и гранта Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением № 21/2022 от 14.04.2022.

1. M. Bernardi et al., Nano Lett. **13**, 3664 (2013).
2. P. Tonndorf et al., Opt. Express **21**, 4908 (2013).
3. H. Song et al., Sci. Rep. **2**, 1 (2012).
4. A.A. Kistanov et al., J. Mater. Chem. C. **3**, 518 (2018).
5. B.R. Borodin, F.A. Benimetskiy, P.A. Alekseev, J. Phys.: Conf. Ser. **2103**, 012090 (2021).

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ Mn НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЕВ РАЗБАВЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛУПРОВОДНИКА GaMnAs

М.В. Ведь, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, С.Ю. Зубков,
Р.Н. Крюков, А.В. Кудрин, В.П. Лесников, Д.Е. Николичев
*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*

E-mail: kriukov.ruslan@yandex.ru

В ходе многолетних исследований характеристик разбавленного магнитного полупроводника (РМП) GaMnAs было проведено множество экспериментальных и теоретических исследований, направленных на улучшение его физико-химических свойств, для дальнейшего практического применения при проектировании приборов спинтроники. Основополагающей проблемой является установление механизма ферромагнитного упорядочивания магнитных моментов в РМП и взаимосвязи между магнитными свойствами РМП и концентрацией Mn.

В ходе исследований были изучены образцы, представляющие собой слои $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$, выращенные на подложке $n\text{-GaAs}$ (001) импульсным лазерным распылением мишени из металлического Mn и GaAs [1] при температуре 200-350 °С. В процессе роста варьировалось количество арсина (газа-носителя) в камере роста в диапазоне 0 – 3.5 мкмоль. Исследования образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии проводились на комплексе Multiprobe RM (Omicron Nanotechnology GmbH, Германия) с последующим анализом данных с применением SFR-методики [2].

Примененный алгоритм обработки позволил установить, что в слоях GaMnAs атомы Mn находятся в химических связях Mn-As и Mn-Ga, часть атомов металла находятся в позициях замещения (Mn_{Ga}) в матрице GaAs. Содержание и соотношение концентрации химических связей Mn определяется общим количеством атомов этого элемента в системе. Концентрация Mn_{Ga} достигает максимального значения при общей концентрации Mn в 6 ат. % после чего плавно спадает. По этой причине отсутствие изменений магнитных характеристик системы GaMnAs при большем содержании Mn [3] не может быть объяснено в рамках механизма РККИ, используемого для описания ферромагнетизма в РМП [4]. Таким образом, ферромагнетизм в слоях GaMnAs подразумевает наличие второго механизма магнитного упорядочения.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-265.2022.1.2.

1. B.N. Zvonkov et al., J. Opt. Technol. **75**, 389 (2008).
2. A.V. Boryakov et al., J. Elec. Spectr. and Related Phen. **50(11)**, 1443 (2018).
3. S. Mack et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 192502 (2008).
4. T. Jungwirth et al., Rev. of Mod. Phys. **78(3)**, 809 (2006).

ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ОДИНОЧНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ LaF_3 , ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ БИОМЕДИЦИНЫ

Ю.Г. Вайнер¹, Ф.В. Верещагин¹, Ю.В. Орловский², Г.О. Силаев¹,
А.Т. Шайдулин²

¹Институт спектроскопии РАН, Москва

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

E-mail: vainer@isan.troitsk.ru

В подавляющем числе случаев наночастицы изучают в виде порошков или суспензий, что приводит к искажению информации об индивидуальных свойствах частиц. Поэтому разработка методов изучения и визуализации наночастиц на уровне одиночных является одним из актуальных направлений современной нанофотоники.

Обычно, для визуализации одиночных наночастиц применяют электронный или зондовые микроскопы (туннельный, атомно-силовой, оптический ближнепольный и др.). Однако такие микроскопы чрезвычайно дороги и характеризуются сложной процедурой подготовки образца и измерений. Кроме того, методы электронной микроскопии малопригодны для исследований биологических объектов в водных средах. В случае использования сканирующих зондовых микроскопов, необходимо также учитывать, нежелательное воздействие нанозонда на образец.

Методы оптической дальнеполевой микроскопии свободны от большинства из перечисленных недостатков и характеризуются высокой оперативностью, малым воздействием на образец, существенно более простой процедурой измерений и более низкой стоимостью аппаратуры.

Сообщается о результатах оптической диагностики одиночных диэлектрических нанокристаллов фторида лантана - LaF_3 , допированных ионами европия (Eu^{3+}) и неодима (Nd^{3+}), имеющих размеры в пределах 10 – 30 нм, и их конгломератов с применением разработанных лазерных микроскопов «светового листа» и «скользящего падения», работающих в режиме регистрации сигналов на несмещенной лазерной частоте. Приводятся также результаты сравнительных измерений размеров одних и тех же наночастиц с помощью электронного и разработанных микроскопов, а также ансамблевых измерений наночастиц и их суспензий в воде с применением метода динамического рассеяния света (ДРС).

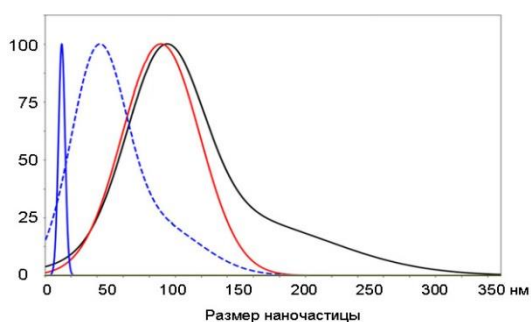


Рис. 1. Распределения нанокристаллов $\text{LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$ по размерам, измеренные с помощью ПЭМ (сплошная и пунктирная синие линии), и с помощью микроскопа светового листа (черная линия) и методом ДРС (красная линия).

КОЛЛОИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ PbS ДЛЯ ДЕКОРИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ TiO₂ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ФОТОКАТАЛИЗА

С.В. Асланов, А.С. Перепелица

Воронежский государственный университет, Воронеж

E-mail: a-perepelitsa@yandex.ru

В данной работе разработана методика декорирования наночастиц диоксида титана (НЧ TiO₂) коллоидными квантовыми точками PbS (КТ PbS), синтезированными в рамках водного синтеза в растворах пассиваторов (тиогликолевой (PbS/TGA), 2-меркаптопропионовой (PbS/2-MPA) или 3-меркаптопропионовой (PbS/3-MPA) кислот).

Согласно данным структурных исследований, выполненных с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Libra 120 Plus (Carl Zeiss, Германия) средний размер частиц составлял для КТ PbS/TGA – 2.9 ± 0.5 нм, для КТ PbS/2-MPA – 3.1 ± 0.7 нм и для КТ PbS/3-MPA – 2.7 ± 0.4 нм. Данные рентгеноструктурного анализа показали формирование кристаллитов, обладающих кубической кристаллической решеткой с пространственной группой *Fm3m*.

Спектры оптического поглощения всех приготовленных образцов представляют собой широкие бесструктурные полосы со слабыми особенностями в районе 1000 нм, соответствующих экситонному переходу. Для исследованных образцов зарегистрирована фотолюминесценция с максимумом в районе 1140 нм при возбуждении излучением из видимой области спектра. В случае КТ PbS/2-MPA и PbS/TGA спектры люминесценции имеют явную асимметрию с длинноволновой стороны. Полуширина полос в зависимости от типа пассиватора составляла 275 нм (0.25 эВ) для КТ PbS/TGA, 345 нм (0.33 эВ) для КТ PbS/2-MPA и 270 нм (0.27 эВ) для КТ PbS/3-MPA. Стоксов сдвиг максимума люминесценции относительно особенности в оптическом поглощении составлял 140 нм (~ 0.15 эВ). Характерной особенностью наблюдаемой люминесценции являются большие времена жизни от 2.5 до 4.5 мкс в зависимости от типа использованного пассиватора.

Формирование агрегатов НЧ TiO₂/КТ PbS приводит к тушению люминесценции КТ вне зависимости от типа пассивирующих молекул. Экспериментальные данные показывают, что формирование агрегатов НЧ TiO₂/КТ PbS обеспечивает повышение эффективности продуцирования ОН-радикалов до 10 раз и повышению чувствительности к излучению из видимой области спектра по сравнению с чистыми НЧ TiO₂, что свидетельствует о пригодности разработанного нами метода для сенсбилизации НЧ TiO₂.

Исследование поддержано Грантом Президента РФ МК-4406.2022.1.2.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ МАГНИТНОЙ ГИПЕРТЕРМИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОСОВМЕСТИМЫХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА IN VIVO

В.П. Агеев¹, М.Н. Жарков¹, О.А. Куликов¹, Н.А. Пятаев¹, Г.Б. Сухоруков²,
В.И. Шляпкина¹, Д.Э. Якобсон¹

¹*Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

²*Лондонский университет королевы Марии, Лондон, Великобритания*
E-mail: ykbsn@mail.ru

Регионарная магнитная гипертермия (МГ) является многообещающим методом в комплексной терапии опухолей, основанным на воздействии высокочастотного магнитного поля на магнитные наночастицы [1]. Однако на данный момент существует небольшое количество магнитных субстанций, пригодных для клинических применений. Известно о магнитной субстанции компании «MagForce AG» [2] на основе наночастиц оксида железа, покрытых аminosиланом. Однако данные частицы обладают низкой биodeградацией, что является основным недостатком. В данной работе мы получили биосовместимые наночастицы, стабилизированные олеиновой кислотой и олеатом натрия ($Fe_3O_4@OA$) [3], которые могут быть успешно применены для регионарной гипертермии. Представлен результат исследования противоопухолевой активности магнитной гипертермии с использованием $Fe_3O_4@OA$.

Наночастицы оксида железа были получены по модифицированному методу соосаждения. Результаты исследования физико-химических характеристик показали, что средний размер $Fe_3O_4@OA$ составил 8.7 ± 3.1 нм (Просвечивающая электронная микроскопия), ζ -потенциал – -65 ± 3 мВ при pH = 7.7, массовая концентрация железа в суспензии 112 мг/мл, SAR – 12 Вт/г Fe. Исследование противоопухолевой активности проводилось на крысах линии Вистар с трансплантированной опухолью карциносаркомы Walker 256. Область опухоли равномерно обкалывали суспензией магнитных наночастиц, а для облучения животных использовали переменное магнитное поле с частотой 100 кГц и амплитудой 8 кА/м. Температуру опухолевой ткани контролировали с помощью тепловизионной камеры и датчика термодпары. Результаты исследования показали сначала замедление роста, а потом и полную гибель опухоли у 86 % животных на 30 день после проведения терапии, у 14 % животных наблюдался рецидив в виде дальнейшего роста опухоли (экспериментальная группа). Рост и метастазирование опухоли в контрольной группе, не получавшей терапию, наблюдалось в течение всего эксперимента и животные в данной группе погибли на 21-день.

Работа поддержана РФФИ (грант 19-29-10013).

1. Kh. El-Boubbou, Nanomedicine. Rev. **223** (2018).
2. N. Waldoefner, A. Jordan., the Nanotherm Therapy **442** (2018).
3. O.A. Kulikov et al., Int. J. Mol. Sci. **23**, 4234 (2022).

СИСТЕМЫ ЯДРО-ОБОЛОЧКА ДЛЯ ДОСТАВКИ НАНОЧАСТИЦЫ В ЖИВЫХ ОБЪЕКТАХ

Р.А. Анисимов¹, В.И. Кочубей¹, М.В. Ломова¹, И.Ю. Янина^{1,2}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

²Томский национальный исследовательский государственный
университет, Томск

E-mail: irina-yanina@yandex.ru

Тераностические технологии позволяют визуализацию и терапию в онкологии с помощью нанометодов с возможностью адресной доставки как действующих агентов, так и визуализирующих соединений.

С целью повышения интенсивности люминесценции частицы покрывают оболочкой. Это предотвращает безызлучательную передачу энергии в окружающую среду. При использовании апконверсионных наночастиц сообщается об эффективности создания гетерогенных структур ядро-оболочка, таких как $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}@\text{NaGdF}_4$, $\text{NaYF}_4:\text{Ln}^{3+}@\text{CaF}_2$, которые приводят к увеличению интенсивности апконверсионной люминесценции более чем в 300 раз [1]. Кроме того, оболочка предоставляет возможность мультифункционализации наночастиц.

Были получены системы ядро-оболочка субмикронного размера содержащие апконверсионные наночастицы. В качестве ядра были использованы субмикронные частицы CaCO_3 [2]. Оболочку из бычьего сывороточного альбумина создавали по методу послойной адсорбции [3]. Изображения полученных частиц CaCO_3 приведены на рис. 1. Согласно полученным данным средний размер пор варьируется в пределах 30-80 нм, что сопоставимо с размером капсулированных частиц.

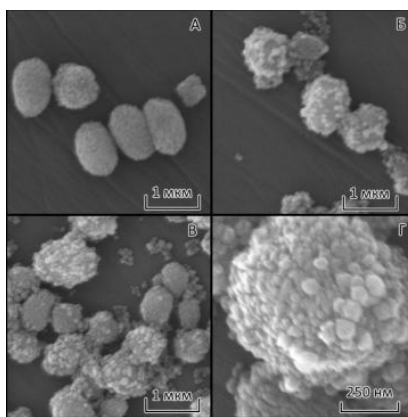


Рис. 1. СЭМ изображения слоёв, наносимых на частицы CaCO_3 методом последовательной адсорбции. А – CaCO_3 . Б – $\text{CaCO}_3(\text{BSA}/\text{NaYF}_4)$. В и Г – $\text{CaCO}_3(\text{BSA}/\text{NaYF}_4/\text{BSA})$.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-10057.

1. G. Chen et al., Chem. Rev. **114**, 5161 (2014).
2. G. Kozlova et al., Inorganics **8**, 11 (2020).
3. A. Demina et al., Mater. Chem. Front. **5**, 2007 (2021).

ХАРАКТЕРИСТИКИ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ФТОРИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ SrF₂:Ho И SrF₂:Ho,Yb
ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ УРОВНЯ ⁵I₇
ИОНОВ Ho³⁺

С.В. Гушин¹, С.В. Кузнецов², А.А. Ляпин¹, В.Ю. Пройдакова²,
П.А. Рябочкина¹, П.П. Федоров²

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: serg.guschin1703@gmail.com

Ап-конверсионные материалы, легированные редкоземельными ионами, широко используются в различных областях науки и техники: маркеры для выявления контрафактной продукции, визуализаторы лазерного излучения, твердотельные лазеры, биологические сенсоры, солнечные батареи [1-3].

В настоящей работе объектами исследования являлись концентрационные серии фторидных люминофоров со структурой флюорита SrF₂:Ho и SrF₂:Ho,Yb синтезированные методом соосаждения из водных растворов.

При возбуждении уровня ⁵I₇ ионов Ho³⁺ для люминофоров SrF₂:Ho и SrF₂:Ho,Yb были зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции в видимой и ближней инфракрасной области спектра, соответствующие электронным переходам ⁵F₃ → ⁵I₈, ⁵S₂(⁵F₄) → ⁵I₈, ⁵F₅ → ⁵I₈, ⁵I₄ → ⁵I₈, ⁵F₃ → ⁵I₆, ⁵I₅ → ⁵I₈, ⁵F₅ → ⁵I₇, ⁵I₆ → ⁵I₈ ионов Ho³⁺ и ²F_{5/2} → ²F_{7/2} ионов Yb³⁺. Также были определены количественные характеристики ап-конверсионной люминесценции исследованных люминофоров. Максимальные значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции для люминофора SrF₂:Ho (3.5 %) составили 0.03 % (380-780 нм) и 0.09 % (380-1100 нм). Солегирование люминофоров SrF₂:Ho ионами Yb³⁺ привело к увеличению эффективности ап-конверсионного преобразования. Таким образом, максимальные значения энергетического выхода для люминофора SrF₂:Ho (3.4 %), Yb (1.0 %) составили 0.1 % (380-780 нм) и 1.37 % (380-1100 нм). Также в работе были определены координаты цветности и коррелированные цветовые температуры ап-конверсионного излучения исследуемых люминофоров. Выявлено, что при изменении концентрации РЗ ионов и плотности мощности возбуждающего лазерного излучения, люминофоры SrF₂:Ho и SrF₂:Ho,Yb сохраняют стабильное свечение в красной области спектра.

1. X. Liu et al., Nat. Commun. **12**, 5662 (2021).
2. A. Ghazy et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **230**, 111234 (2021).
3. F. Auzel, Chem. Rev. **104**, 139 (2004).

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С МАГНИТНЫМИ МНОГОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

М.В. Бузаева^{1,2}, И.А. Макарова¹, В.А. Сергеев^{1,2}

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск

²Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

E-mail: m.buzaeva@mail.ru

Полимерные композиты, содержащие углеродные нанотрубки (УНТ) обладают уникальной комбинацией электрических, оптических, механических и сорбционных свойств, представляя собой материалы, используемые в различных областях техники, приборостроения. Придание магнитных свойств УНТ - одно из направлений их применения в исходном виде и в виде композитов [1]. Для придания магнитных свойств применяются золь-гель процесс осаждения наночастиц γ - Fe_2O_3 на поверхности карбоксилированных УНТ, химическое осаждение из паровой фазы с применением железо- или никельсодержащих прекурсоров, метод самостоятельной сборки Fe_3O_4 на поверхности нанотрубок, процесс пиролиза, синтез с использованием шаблонов на основе мезопористого кремнезема и анодного оксида алюминия.

Процесс наполнения - это самый простой метод изготовления магнитных углеродных композитов. Пористая природа УНТ играет ключевую роль в этом процессе. Используют два основных метода: заполнение пор УНТ феррожидкостью или заполнение предшественником магнитных частиц, а затем восстановление предшественника. Подобные магнитные материалы применяются в биотехнологиях, медицине и промышленности [2].

Путем обработки многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в растворе хлорида железа (III) и NaOH в диэтиленгликоле была значительно увеличена их магнитная восприимчивость, что позволяет выравнивать такие «магнитные» МУНТ в полимере в магнитных полях с индукцией менее 0.5 Тл. Показано, что у полимерных пленочных структур на основе поливинилового спирта, полиметилметакрилата, полианилина с МУНТ, отвержденных в сильном магнитном поле, электропроводность в направлении, перпендикулярном поверхности пленки, примерно на 2 порядка больше, чем у пленок с МУНТ, отвержденных в отсутствие магнитного поля, без измерения характера проводимости [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Ульяновской области, проект №19-42-730011 р-а.

1. G. Korneva et al., Nano Lett., **5**, 879 (2005).
2. M. Samadishadlou et al., Nanomedicine and Biotechnology **46**, 1314 (2018).
3. S.V. Vasin, M.S. Efimov, V.A. Sergeev, Tech. Phys. Lett. **46**, 595 (2020).

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ АНСАМБЛЕЙ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА СВИНЦА В ПРИСУТСТВИИ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА

И.Г. Гревцева, В.Н. Дерепко, А.С. Перепелица
Воронежский государственный университет, Воронеж
E-mail: grevtseva_ig@inbox.ru

В данной работе представлены результаты спектрально-люминесцентных свойств гибридных наноструктур на основе коллоидных квантовых точек сульфида свинца (КТ PbS) и плазмонных наностержней золота (НСт Au). Данные гибридные наноструктуры настроены на эффективное поглощение и фотолюминесценцию в ближней ИК области (~900-1100 нм).

Коллоидные КТ PbS, средним размером 2.6 ± 0.5 нм, были получены в рамках водной методики синтеза, аналогично ранее разработанной и реализованной авторами доклада для квантовых точек сульфида серебра [1]. Формирование НСт Au со средним соотношением длины к диаметру 40 ± 5 нм на 9 ± 2 нм, также осуществляли в рамках водного синтеза в присутствии поверхностно активного вещества цетилтриметиламмония бромида [2]. Формирование гибридных структур осуществляли путем смешивания коллоидных растворов КТ PbS и НСт Au в молярном соотношении $[v(\text{НСт})]:[v(\text{КТ})] \sim 10^{-8}, 10^{-7}$ и 10^{-6} м.д.

Установлено усиление интенсивности люминесценции КТ PbS в 2 и 3 раза с одновременной асимметрией контура полосы люминесценции в области 1050 нм при формировании гибридных структур с НСт Au в молярном соотношении 10^{-8} м.д. и 10^{-7} м.д., соответственно. Последующее повышение концентрации НСт Au способствует длинноволновому сдвигу максимума полосы люминесценции КТ PbS от 900 до 1070 нм при неизменной интенсивности свечения. Такое поведение люминесцентных свойств КТ PbS свидетельствует о сложной картине проявления плазмон-экситонного взаимодействия для ансамбля КТ. Различная ориентация и взаимное пространственное распределение компонентов плазмон-экситонной смеси, вероятно, предполагает возможность одновременного проявления нескольких эффектов, например, эффект Парселла и эффект Фано. При этом большая концентрация КТ PbS в смесях с НСт Au предполагает наличие КТ, свободных от взаимодействия с НСт, свечение которых также будет давать свой вклад в результирующие люминесцентные свойства плазмон-экситонных наноструктур.

Работа поддержана грантом Президента РФ № МК-3746.2022.1.2.

1. O.V. Ovchinnikov et al., Opt. Quantum Electron. **52**, 198 (2020).
2. I. Grevtseva et al., Opt. Express. **30**, 4668 (2022).

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ β -NaRF₄ (R = Y, Yb, Lu)
СОЛЬВОТЕРМАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Н.А. Архарова, Д.Н. Каримов, А.В. Кошелев, К.В. Хайдуков
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
E-mail: avkoshelev03@gmail.com

Фторидные нанокристаллы β -NaRF₄, легированные ионами РЗЭ, являются основой для создания перспективных флуоресцентных материалов для различных наукоемких и высокотехнологичных отраслей (биомедицина, фотокатализ, наносенсорика и т.д.), что объясняется возможностью получения фотолюминесцентного излучения в широком спектральном диапазоне, как по стоксовому, так и по антистоксовому механизмам при низкоэнергетическом возбуждении [1]. Несмотря на существенный прогресс химических подходов получения наночастиц, обеспечение высокой повторяемости морфологических и структурных свойств при синтезе получаемых объектов, что оказывает определяющее влияние на эффективность их люминесценции, остается серьезной проблемой [2]. Для расширения потенциальных возможностей данных материалов подбор условий для воспроизводимого получения частиц с требуемыми структурными, морфологическими и размерными характеристиками, являются крайне актуальной задачей.

Данная работа посвящена оптимизация синтеза наночастиц на основе гексагональных матриц NaYF₄, NaYbF₄ и NaLuF₄, легированных ионами РЗЭ, методом высокотемпературного соосаждения в среде высококипящих растворителей. Методами рентгенофазового анализа (РФА) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) было изучено влияние различных экспериментальных параметров (методики соосаждения, соотношений прекурсоров и растворителей) на структуру и морфологию частиц. Были определены оптимальные условия для получения монодисперсных кристаллов в наноразмерном диапазоне.

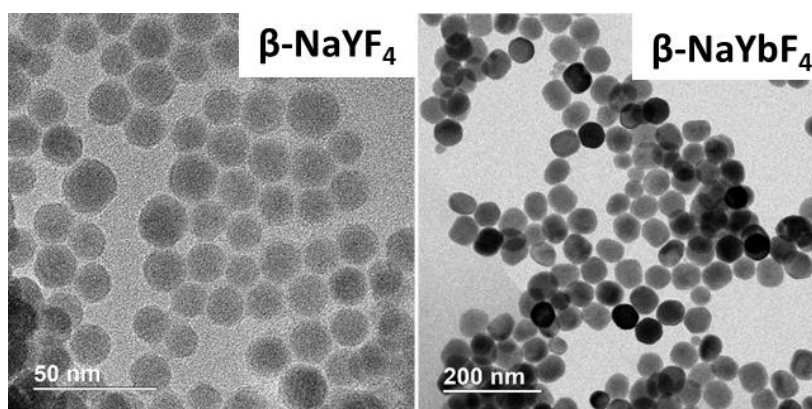


Рис. 1. ПЭМ изображения наночастиц β -NaYF₄ и β -NaYbF₄, легированных ионами Yb³⁺/Er³⁺.

1. A. Nadort, J. Zhao, E.M. Goldys, *Nanoscale* **8**, 13099 (2016).
2. D.N. Karimov et al., *Nanotechnol. Russia* **15**, 655 (2020).

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ СЛОЕВ ГЕРМАНИЯ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ HWCVD, ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТРОЙСТВ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Н.А. Алябина, С.А. Денисов, А.М. Титова, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
E-mail: asya_titova95@mail.ru

Разработанный в лаборатории (НИФТИ ННГУ) метод газофазного осаждения с разложением моногермана на «горячей проволоке» является основой для роста гетероструктур со слоями Ge на Si-подложке. высокое качество слоев подтверждено данными рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопией, атомно-силовой микроскопией, химическим травлением с наблюдением плотности ямок травления (дислокации). Важным условием дальнейшего применения выращенных структур является их *in situ* легирование.

Разработаны методы легирования в процессе HWCVD для слоев n- и p-типа проводимости. Одним из них является предложенный и реализованный нами метод испарения путем сублимации атомов легирующей примеси (Ga и Sb) из источника в виде монокристаллического германия, легированного заданной примесью. Данным методом были выращены гетероструктуры со слоями Ge, легированными до $\approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Для выращивания эпитаксиальных слоев Ge легированных донорной примесью, нами был использован метод испарения фосфора при его сублимации из соединения GaP из эффузионной ячейки. Данный метод используется при легировании Ge слоев в процессе МЛЭ. Нами впервые он был использован в CVD установки. Данным методом нами были выращены эпитаксиальные слои $n^+\text{-Ge:P}$ с концентрацией электронов $1.3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Слои Ge, легированные фосфором были выращены нами на подложках Si (001) с высокой концентрацией дырок ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, кремний марки КДБ-0.001). Такие гетероструктуры $n^+\text{-Ge/p}^+\text{-Si(001)}$ были исследованы нами с точки зрения использования их для изготовления тестовых светоизлучающих диодов (СИД). На них стандартным методом фотолитографии формировали меза-диоды с прямоугольной сеткой контактов на лицевой стороне и сплошным омическим контактом Ti-Pt-Au со стороны подложки.

Вольт-амперные характеристики имели на прямой ветви область отрицательного дифференциального сопротивления. Исследование светоизлучающих свойств меза-структур показало, что электролюминесценция наблюдалась при комнатной температуре с пиковой энергией излучения фотонов $\approx 0.61 \text{ эВ}$, связанная с непрямыми межзонными оптическими переходами в слоях $n^+\text{-Ge:P}$. При увеличении концентрации фосфора в слоях $n^+\text{-Ge:P}$ интенсивность электролюминесценции увеличивалась.

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

OPTICAL MICROSCOPY OF SINGLE NANOCRYSTALS LaF_3 , PROMISING FOR BIOMEDICAL PURPOSES

Yu.V. Orlovskii¹, A.T. Shaydulin¹, G.O. Silaev², Yu.G. Vainer²,
F.V. Vereschagin¹

¹*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*Institute of Spectroscopy of RAS, Troitsk, Russia*

E-mail: vainer@isan.troitsk.ru

In most cases, nanoparticles are studied in the form of powders or suspensions, which leads to distortion of information about the individual properties of the particles. Therefore, the development of methods for studying and visualizing nanoparticles at the single level is one of the current directions of modern nanophotonics.

Usually, electron or probe microscopes (tunneling, atomic force, near-field optical, etc.) are used to visualize single nanoparticles. However, such microscopes are extremely expensive and are characterized by a complex sample preparation and measurement procedure. In addition, electron microscopy methods are difficult to use for study of biological objects in aquatic environments. In the case of using scanning probe microscopes, it is also necessary to take into account the undesirable effect of the nanoprobe on the sample.

Optical far-field microscopy methods are free from most of the above disadvantages and are characterized by high efficiency, low impact on the sample, a significantly simpler measurement procedure and lower cost of equipment.

The results of optical diagnostics of single dielectric nanocrystals of lanthanum fluoride - LaF_3 , doped with europium (Eu^{3+}) and neodymium (Nd^{3+}) ions with sizes ranging from 10 to 30 nm and their conglomerates using the developed laser «light sheet» and «sliding drop» microscopes operating in the mode of recording signals on unbiased laser frequency. The results of comparative measurements of the same nanoparticles using electron and developed microscopes, as well as ensemble measurements of nanoparticles and their suspensions in water using the dynamic light scattering (DRS) method are also presented.

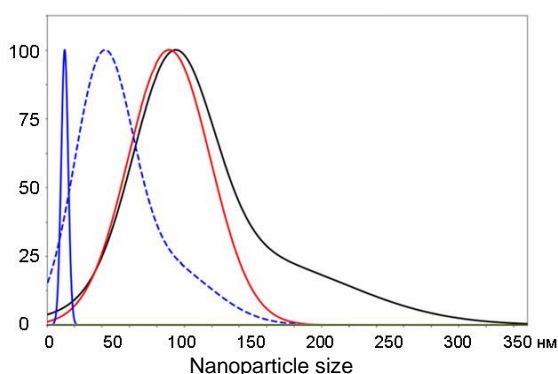


Fig. 1. Size distributions of $\text{LaF}_3:\text{Nd}^{3+}$ nanocrystals measured using TEM (*solid and dotted blue lines*), light sheet microscope (*black line*) and the DLS method (*red line*).

COLLOIDAL PbS QUANTUM DOTS FOR DECORATION OF TiO₂ NANOPARTICLES FOR PHOTOCATALYSIS APPLICATIONS

S.V. Aslanov, A.S. Perepelitsa

Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: a-perepelitsa@yandex.ru

In this work, we developed a technique for decorating titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) with colloidal PbS quantum dots (PbS QDs) synthesized in aqueous synthesis in solutions of passivators (thioglycolic (PbS/TGA), 2-merkaaptopropionic (PbS/2-MPA) or 3-mercaptopropionic (PbS/3-MPA) acids).

According to the data of structural studies performed using a transmission electron microscope (TEM) Libra 120 Plus (Carl Zeiss, Germany), the average particle size was 2.9 ± 0.5 nm for PbS/TGA QDs and 3.1 ± 0.7 nm for PbS/2-MPA QDs. and for PbS/3-MPA QDs, 2.7 ± 0.4 nm. X-ray diffraction analysis data showed the formation of crystallites with a cubic crystal lattice with the space group *Fm3m*.

The optical absorption spectra of all prepared samples are broad structure less bands with weak features in the region of 1000 nm, corresponding to the exciton transition. For the studied samples, photoluminescence was recorded with a maximum in the region of 1140 nm upon excitation by radiation from the visible region of the spectrum. In the case of PbS/2-MPA and PbS/TGA QDs, the luminescence spectra have a clear asymmetry on the long-wavelength side. The half-width of the bands, depending on the type of passivator, was 275 nm (0.25 eV) for PbS/TGA QDs, 345 nm (0.33 eV) for PbS/2-MPA QDs, and 270 nm (0.27 eV) for PbS/3-MPA QDs. The Stokes shift of the luminescence maximum with respect to the singularity in optical absorption was 140 nm (~ 0.15 eV). A characteristic feature of the observed luminescence is the long lifetime from 2.5 to 4.5 μ s, depending on the type of passivator used.

The formation of TiO₂ NP/PbS QDs aggregates leads to QD luminescence quenching regardless of the type of passivating molecules. Experimental data show that the formation of aggregates of TiO₂ NP/PbS QDs provides an increase in the efficiency of production of \cdot OH radicals by up to 10 times with an increase in sensitivity to radiation from the visible region up to 150 times compared to pure TiO₂ NPs, that indicates the suitability of our method for sensitization of TiO₂ NPs.

The study was supported by the Grant of the President of the Russian Federation MK-4406.2022.1.2.

A STUDY OF THE ANTI-TUMOUR ACTIVITY OF MAGNETIC HYPERTHERMIA USING BIOCOMPATIBLE IRON OXIDE NANOPARTICLES IN VIVO

V.P. Ageev¹, O.A. Kulikov¹, N.A. Pyataev¹, V.I. Shlyapkina¹,
G.B. Sukhorukov², D.E. Yakobson¹, M.N. Zharkov¹

¹*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

²*Queen Mary University of London, London, UK*

E-mail: ykbsn@mail.ru

Regional magnetic hyperthermia (MHT) is a promising technique in comprehensive tumour therapy, based on the effects of high-frequency magnetic fields on magnetic nanoparticles [1]. However, there are currently few magnetic substances suitable for clinical applications. A magnetic substance from MagForce AG [2] based on iron oxide nanoparticles coated with aminosilane is known. However, these particles have a low biodegradability, which is a major disadvantage. In this work, we have obtained biocompatible nanoparticles stabilised with oleic acid and sodium oleate (Fe₃O₄@OA) [3], which can be successfully applied for regional hyperthermia. The result of a study on the antitumour activity of magnetic hyperthermia using Fe₃O₄@OA is presented.

Iron oxide nanoparticles were obtained using a modified co-precipitation method. The results of the physico-chemical characterisation study showed that the average size of Fe₃O₄@OA was 8.7 ± 3.1 nm (transmission electron microscopy), ζ -potential -65 ± 3 mV at pH = 7.7, mass concentration of iron in suspension 112 mg/mL, SAR - 12 W/g Fe.

A study of antitumour activity was carried out on Wistar rats with transplanted Walker 256 carcinosarcoma tumours. The tumour area was uniformly irradiated with a suspension of magnetic nanoparticles, and an alternating magnetic field with a frequency of 100 kHz and amplitude of 8 kA/m was used to irradiate the animals. The temperature of the tumour tissue was monitored using a thermal imaging camera and thermocouple sensor. The results showed first a slowing down of growth and then a complete death of the tumour in 86 % of the animals on day 30 after treatment, with 14 % of animals experiencing a recurrence of further tumour growth (experimental group). Tumour growth and metastasis in the control group, which did not receive therapy, was observed throughout the experiment and the animals in this group died at 21 days.

The work is supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 19-29-10013).

1. Kh. El-Boubbou, *Nanomedicine. Rev.* **223** (2018).
2. N. Waldoefner, A. Jordan., *the Nanotherm Therapy* **442** (2018).
3. O.A. Kulikov et al., *Int. J. Mol. Sci.* **23**, 4234 (2022).

CORE-SHELL SYSTEMS FOR NANOPARTICLE DELIVERY IN LIVING OBJECTS

R.A. Anisimov¹, V.I. Kochubey¹, M.V. Lomova¹, I.Yu. Yanina^{1,2}

¹*Saratov National Research State University, Saratov, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

E-mail: irina-yanina@yandex.ru

Theranostic technologies allow imaging and therapy in oncology using nanomethods with the possibility of targeted delivery of both active agents and imaging compounds.

In order to increase the luminescence intensity, the particles are coated with a shell. This prevents non-radiative transfer of energy to the environment. When using upconversion nanoparticles, the efficiency of creating heterogeneous core-shell structures, such as NaYF₄:Yb³⁺/Er³⁺@NaGdF₄, NaYF₄:Ln³⁺@CaF₂, is reported, which lead to an increase in the intensity of upconversion luminescence by more than 300 times [1]. In addition, the shell provides the possibility of multifunctionalization of nanoparticles.

Submicron core-shell systems containing upconversion nanoparticles were obtained. Submicron particles of CaCO₃ were used as the core [2]. The shell of bovine serum albumin was created by the layer-by-layer adsorption method [3]. The images of the resulting CaCO₃ particles are shown in Fig. 1. According to the data obtained, the average pore size varies within 30-80 nm, which is comparable to the size of encapsulated particles.

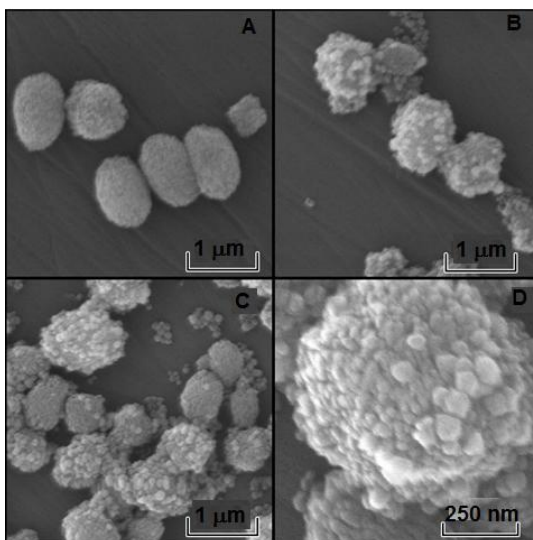


Fig. 1. SEM images of layers deposited on CaCO₃ particles by the sequential adsorption method. A - CaCO₃. B – CaCO₃(BSA/NaYF₄). C and D - CaCO₃(BSA/NaYF₄/BSA).

The study was supported by a grant Russian Science Foundation No. 21-72-10057.

1. G. Chen et al., Chem. Rev. **114**, 5161 (2014).
2. G. Kozlova et al., Inorganics **8**, 11 (2020).
3. A. Demina et al., Mater. Chem. Front. **5**, 2007 (2021).

CHARACTERISTICS OF UP-CONVERSION LUMINESCENCE
OF FLUORIDE PHOSPHORS SrF₂:Ho AND SrF₂:Ho,Yb
UPON EXCITATION BY LASER RADIATION AT ⁵I₇ LEVEL OF Ho³⁺ IONS

P.P. Fedorov¹, S.V. Gushchin², S.V. Kuznetsov¹, A.A. Lyapin²,
V.Yu. Proydakova¹, P.A. Ryabochkina²

¹*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

E-mail: serg.guschin1703@gmail.com

Up-conversion materials doped with rare-earth ions are widely used in various fields of science and technology: markers for detecting counterfeit products, laser radiation visualizers, solid-state lasers, biological sensors, solar batteries [1-3].

In the present paper, we have investigated strontium fluoride phosphors with fluorite structure SrF₂:Ho and SrF₂:Ho,Yb with different concentration of Ho³⁺ and Yb³⁺ ions. Fluorite-type SrF₂:Ho and SrF₂:Ho,Yb phosphors were synthesized by using a co-precipitation from an aqueous nitrate solution technique.

The up-conversion luminescence (UCL) in SrF₂:Ho and SrF₂:Ho,Yb phosphors in the visible and near-infrared (NIR) spectral region corresponding to transitions ⁵F₃ → ⁵I₈, ⁵S₂(⁵F₄) → ⁵I₈, ⁵F₅ → ⁵I₈, ⁵I₄ → ⁵I₈, ⁵F₃ → ⁵I₆, ⁵I₅ → ⁵I₈, ⁵F₅ → ⁵I₇, ⁵I₆ → ⁵I₈ of Ho³⁺ ions and transition ²F_{5/2} → ²F_{7/2} of Yb³⁺ ions were recorded upon excitation of the ⁵I₇ level of Ho³⁺ ions. The quantitative characteristics of UCL of studied phosphors were also determined. The maximum UCL energy yields of 0.03 % (380-780 nm) and 0.09 % (380-1100 nm) were also received for SrF₂:Ho (3.5 %). The co-doping of SrF₂:Ho phosphors with Yb³⁺ ions led to an increase of the up-conversion efficiency. Thus, the maximum UCL energy yields of 0.1 % (380-780 nm) and 1.37 % (380-1100 nm) were obtained for SrF₂:Ho (3.4 %),Yb (1.0 %) phosphors. The chromaticity coordinates and correlated color temperatures of the UCL of studied phosphors were also measured in the present paper. It was found that the SrF₂:Ho and SrF₂:Ho,Yb phosphors retain a stable glow in the red spectral region upon changing the concentration of RE ions and the power density of exciting laser radiation.

1. X. Liu et al., Nat. Commun. **12**, 5662 (2021).
2. A. Ghazy et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells. **230**, 111234 (2021).
3. F. Auzel, Chem. Rev. **104**, 139 (2004).

POLYMER COMPOSITES WITH MAGNETIC MULTI-WALL CARBON NANOTUBES

M.V. Buzaeva¹, I.A. Makarova¹, V.A. Sergeev^{1,2}

¹*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

²*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk, Russia*

E-mail: m.buzaeva@mail.ru

Polymer composites containing carbon nanotubes (CNTs) have a unique combination of electrical, optical, mechanical and sorption properties, being materials used in various fields of technology and instrumentation. Imparting magnetic properties to CNTs is one of the directions of their application in the initial form and in the form of composites [1]. To impart magnetic properties, the sol-gel process of deposition of γ -Fe₂O₃ nanoparticles on the surface of carboxylated CNTs, chemical vapor deposition using iron- or nickel-containing precursors, the method of self-assembly of Fe₃O₄ on the surface of nanotubes, the pyrolysis process, synthesis using templates based on mesoporous silica and anodic alumina.

The filling process is the simplest method for making magnetic carbon composites. The porous nature of CNTs plays a key role in this process. Two main methods are used: filling CNT pores with ferrofluid or filling magnetic particles with a precursor and then reducing the precursor. Such magnetic materials are used in biotechnology, medicine and industry [2].

By treating multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) in a solution of iron (III) chloride and NaOH in diethylene glycol, their magnetic susceptibility was significantly increased, which makes it possible to align such «magnetic» MWCNTs in a polymer in magnetic fields with an induction of less than 0.5 T. It has been shown that polymer film structures based on polyvinyl alcohol, polymethylmethacrylate, polyaniline with MWCNTs cured in a strong magnetic field have approximately two orders of magnitude higher electrical conductivity in the direction perpendicular to the film surface than films with MWCNTs cured in the absence of a magnetic field, without measuring the nature of the conductivity [3].

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Ulyanovsk Region, project No. 19-42-730011 r-a.

1. G. Korneva et al., *Nano Lett.*, **5**, 879 (2005).
2. M. Samadishadlou et al., *Nanomedicine and Biotechnology* **46**, 1314 (2018).
3. S.V. Vasin, M.S. Efimov, V.A. Sergeev, *Tech. Phys. Lett.* **46**, 595 (2020).

TRANSFORMATION OF THE LUMINESCENT PROPERTIES OF LEAD SULFIDE QUANTUM DOTS ENSEMBLES IN THE PRESENCE OF GOLD PLASMONIC NANOPARTICLES

V.N. Derepko, I.G. Grevtseva, A.S. Perepelitsa
Voronezh State University, Voronezh, Russia
E-mail: grevtseva_ig@inbox.ru

In this paper, we present the results of the spectral-luminescence properties of hybrid nanostructures based on colloidal lead sulfide quantum dots (PbS QDs) and gold plasmonic nanorods (Au NRs). These hybrid nanostructures are tuned for efficient absorption and photoluminescence in the near-IR region (~ 900-1100 nm).

Colloidal PbS QDs with an average size of 2.6 ± 0.5 nm were obtained using an aqueous synthesis procedure similar to that previously developed and implemented by the authors of the report for silver sulfide QDs [1]. The formation of Au NRs with an average length to diameter ratio of 40 ± 5 nm at 9 ± 2 nm was also carried out in the framework of aqueous synthesis in the presence of a surfactant cetyltrimethylammonium bromide [2]. The formation of hybrid structures was carried out by mixing colloidal solutions of PbS QDs and Au NRs in the molar ratio $[\nu(\text{HCT})]:[\nu(\text{CT})] \sim 10^{-8}$, 10^{-7} and 10^{-6} mole fraction (m.f.).

An increase in the intensity of the luminescence of PbS QDs by 2 and 3 times with simultaneous asymmetry of the contour of the luminescence band in the region of 1050 nm during the formation of hybrid structures with Au NRs in a molar ratio of 10^{-8} m.f. and 10^{-7} m.f., respectively, was established. A subsequent increase in the concentration of Au NRs promotes a long-wavelength shift of the maximum of the luminescence band of PbS QDs from 900 to 1070 nm at constant luminescence intensity. This behavior of the luminescent properties of PbS QDs indicates a complex picture of the manifestation of the plasmon-exciton interaction for QD ensemble. The different orientation and mutual spatial distribution of the components of the plasmon-exciton mixture probably suggests the possibility of simultaneous manifestation of several effects, for example, the Purcell effect and the Fano effect. In this case, a high concentration of PbS QDs in mixtures with Au NRs suggests the presence of QDs free from interaction with NRs, whose luminescence will also contribute to the resulting luminescence properties of plasmon-exciton nanostructures.

This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-3746.2022.1.2.

1. O.V. Ovchinnikov et al., *Opt. Quantum Electron.* **52**, 198 (2020).
2. I. Grevtseva et al., *Opt. Express.* **30**, 4668 (2022).

SPECIFICITIES OF THE CONTROLLED SYNTHESIS OF LUMINESCENT β -NaRF₄ ($R = Y, Yb, Lu$) NANOCRYSTALS BY THE SOLVOTHERMAL METHOD

N.A. Arkharova, D.N. Karimov, K.V. Khaydukov, A.V. Koshelev
*Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics»
of RAS, Moscow, Russia*
E-mail: avkoshelev03@gmail.com

Rare-earth doped β -NaRF₄ fluoride nanocrystals are the basis for engineering fluorescent materials for various high-tech industries (biomedicine, photocatalysis, nanosensors, etc.), which is associated with the possibility of photoluminescence generation in a wide spectral range, both in Stokes, and by anti-Stokes mechanisms at low-energy excitation [1]. Despite significant progress in chemical methods for the nanoparticle synthesis, ensuring high reproducibility of morphological and structural properties of the resulted nanocrystals, which has a decisive impact on the luminescence performance, remains a serious challenge [2]. The condition selection for the reproducible production of particles with the required size, structural and morphological properties is extremely essential for creating new prospects of these materials.

This study is devoted to optimizing the synthesis of REE doped β -NaRF₄ ($R = Y, Yb, Lu$) nanoparticles by high-temperature coprecipitation in high-boiling solvents. The influence of various experimental parameters (coprecipitation technique, precursors and solvents ratios) on the particles structure and morphology was studied by XRD-analysis and transmission electron microscopy (TEM). The optimal conditions for preparing monodisperse nanosized crystals were determined.

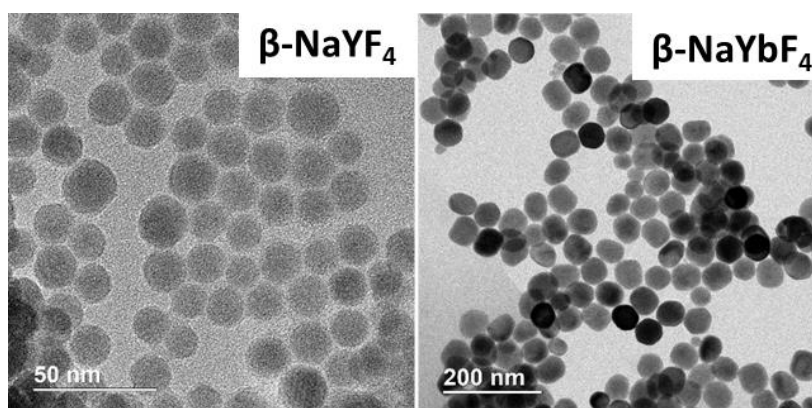


Fig. 1. TEM images of β -NaYF₄ and β -NaYbF₄ nanoparticles doped with Yb³⁺/Er³⁺ ions.

1. A. Nadort, J. Zhao, E.M. Goldys, *Nanoscale* **8**, 13099 (2016).
2. D.N. Karimov et al., *Nanotechnol. Russia* **15**, 655 (2020).

HIGH-QUALITY HETEROEPITAXIAL STRUCTURES BASED ON GERMANIUM LAYERS GROWN BY THE HW CVD METHOD FOR THE CREATION OF MICRO- AND OPTOELECTRONICS DEVICES

N.A. Alyabina, V.Yu. Chalkov, S.A. Denisov, A.M. Titova, V.G. Shengurov
*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russia*
E-mail: asya_titova95@mail.ru

The «Hot Wire» Chemical Vapor Deposition method developed in the laboratory (NIFTI UNN) is the basis for the growth of heterostructures with Ge layers on a Si substrate. The high quality of the layers is confirmed by X-ray diffraction, transmission electron microscopy, atomic force microscopy, chemical etching with observation of the density of etch pits (dislocations). An important condition for the further application of the grown structures is there in situ doping.

Doping methods have been developed in the HW CVD process for n- and p-type layers. One of them is the proposed and implemented by us method of evaporation by sublimation of dopant atoms (Ga and Sb) from a source in the form of single-crystal germanium doped with a given impurity. This method was used to grow heterostructures with Ge layers doped up to $\approx 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

To grow epitaxial Ge layers doped with a donor impurity, we used the method of phosphorus evaporation during its sublimation from the GaP compound from an effusion cell. This method is used when doping Ge layers in the MBE process. We first used it in a CVD setup. Using this method, we have grown n⁺-Ge:P epitaxial layers with an electron density of $1.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Phosphorus-doped Ge layers were grown by us on Si (001) substrates with a high hole concentration ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Such n⁺-Ge/p⁺-Si(001) heterostructures were studied by us from the point of view of their use for fabrication of test light-emitting diodes (LEDs). Mesa diodes with a rectangular grid of contacts on the front side and a solid ohmic Ti-Pt-Au contact on the substrate side were formed on them by the standard photolithography method.

The current-voltage characteristics had a region of negative differential resistance on the straight branch. A study of the light-emitting properties of mesa structures showed that electroluminescence was observed at room temperature with a peak photon emission energy of $\approx 0.61 \text{ eV}$, associated with indirect interband optical transitions in n⁺-Ge:P layers. With an increase in the phosphorus concentration in the n⁺-Ge:P layers, the electroluminescence intensity increased.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЙЯНИЕ С УЧАСТИЕМ ВТОРИЧНЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МОД В КРИСТАЛЛАХ: ГЕНЕРАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНО УПЛОТНЕННЫХ МНОГОВОЛНОВЫХ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

С.Н. Сметанин

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

E-mail: ssmetanin@bk.ru

В настоящее время генерация многоцветного когерентного излучения с узким межволновым интервалом порядка 10 нм и управляемой временной структурой при формировании коротких и ультракоротких импульсов излучения в ближнем инфракрасном диапазоне реализуется в полупроводниковой и оптоволоконной квантовой электронике в связи с особой востребованностью для телекоммуникационных применений, но является нерешенной научной проблемой твердотельной квантовой электроники. Возможным решением данной проблемы является преобразование лазерного излучения путем каскадного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в кристаллах. Частотный сдвиг при этом обычно кратен частоте основной полносимметричной колебательной моды кристалла, лежащей в области 800-1000 см⁻¹. Однако при этом в случае возбуждения лазером с длиной волны около 1 мкм межволновой интервал между компонентами ВКР-излучения имеет порядок 100 нм. Уменьшить межволновой интервал можно при использовании не только основной, но и вторичной колебательных мод кристаллов. В тетрагональных кристаллах кроме основной моды полносимметричных колебаний (800-1000 см⁻¹) имеется достаточно интенсивная вторичная мода деформационных колебаний (250-350 см⁻¹) анионных групп кристаллов, которые могут быть использованы для ВКР с комбинированным сдвигом частоты излучения и уменьшенным межволновым интервалом ВКР-излучения (десятки нанометров). Такое ВКР с участием не только высокоинтенсивной основной колебательной моды, но и менее интенсивной вторичной моды реализуется в процессе возбуждения ультракороткими лазерными импульсами при синхронной лазерной накачке благодаря тому, что нестационарное ВКР определяется интегральным сечением комбинационного рассеяния света, которое имеет близкие значения для основной и вторичной колебательных мод тетрагональных кристаллов. Другим способом является ВКР с комбинированным сдвигом частоты в однофазных твердых растворах родственных кристаллов с оптимизированным относительным содержанием, что позволяет уменьшить межволновой интервал инфракрасного ВКР-излучения до 10 нм. Еще одной интересной особенностью ВКР с участием вторичных колебательных мод в кристаллах является сжатие генерируемых импульсов ВКР-излучения до обратной ширины вторичной (широкой) колебательной моды (до 1 пс и короче).

Работа поддержана грантом РФФ № 22-22-00708.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ С РЕДКИМИ ЗЕМЛЯМИ

К.Н. Болдырев, М.Н. Попова
Институт спектроскопии РАН, Троицк
E-mail: kn.boldyrev@gmail.com

Кристаллы, легированные ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), имеют очень узкие однородные и неоднородные ширины линий оптических переходов $4f^N-4f^N$, поскольку электронная оболочка $4f^N$ хорошо экранирована от кристаллического окружения заполненными $5s$ - и $5p$ -оболочками. Узколинейчатые спектры переходов внутри оболочки $4f^N$ трижды ионизированных РЗ элементов охватывают весь видимый и инфракрасный диапазоны. Материалы, легированные редкоземельными элементами, широко используются в качестве лазерных сред, люминофоров, сцинтилляторов, в солнечных элементах и т. д. В настоящее время успешно развивается люминесцентная термометрия на основе редкоземельных элементов, демонстрирующая широкий рабочий диапазон температур, высокую термочувствительность и пространственное разрешение [1]. За последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в применении кристаллов, легированных редкоземельными элементами, для квантовой обработки информации, в основе которой лежит использование электронно-ядерных сверхтонких уровней [2-8]. Информация о сверхтонких и суперсверхтонких взаимодействиях, изотопических эффектах, неоднородных формах линий и случайных деформациях решетки в кристалле необходима для приложений в современных квантовых технологиях. Её можно получить с помощью оптической спектроскопии высокого разрешения.

Настоящая лекция посвящена серии спектроскопических исследований РЗ материалов с использованием широкодиапазонной люминесцентной спектроскопии высокого разрешения, в том числе во внешнем магнитном поле. Впервые в спектрах люминесценции кристаллов LiYF_4 :Ho наблюдались сверхтонкие и изотопические структуры, а также специфические формы линий, обусловленные случайными деформациями решетки и антипересечениями сверхтонких уровней в магнитном поле (см. рис. 1). Для этого была сконструирована экспериментальная установка, включающая в себя спектрометр высокого разрешения, вакуумные люминесцентный модуль и модуль приема сигнала, сделана криоустановка с возможностью охлаждения до температуры 2.8 К, рассчитаны и изготовлены магнитные сборки с возможностью приложения магнитных полей до 1 Тл. Спектры люминесценции открывают дополнительные возможности, такие как, например, исследование очень малых по размеру и/или сильно разбавленных образцов, а также открывают перспективы для разработки новых типов чувствительных сенсоров.

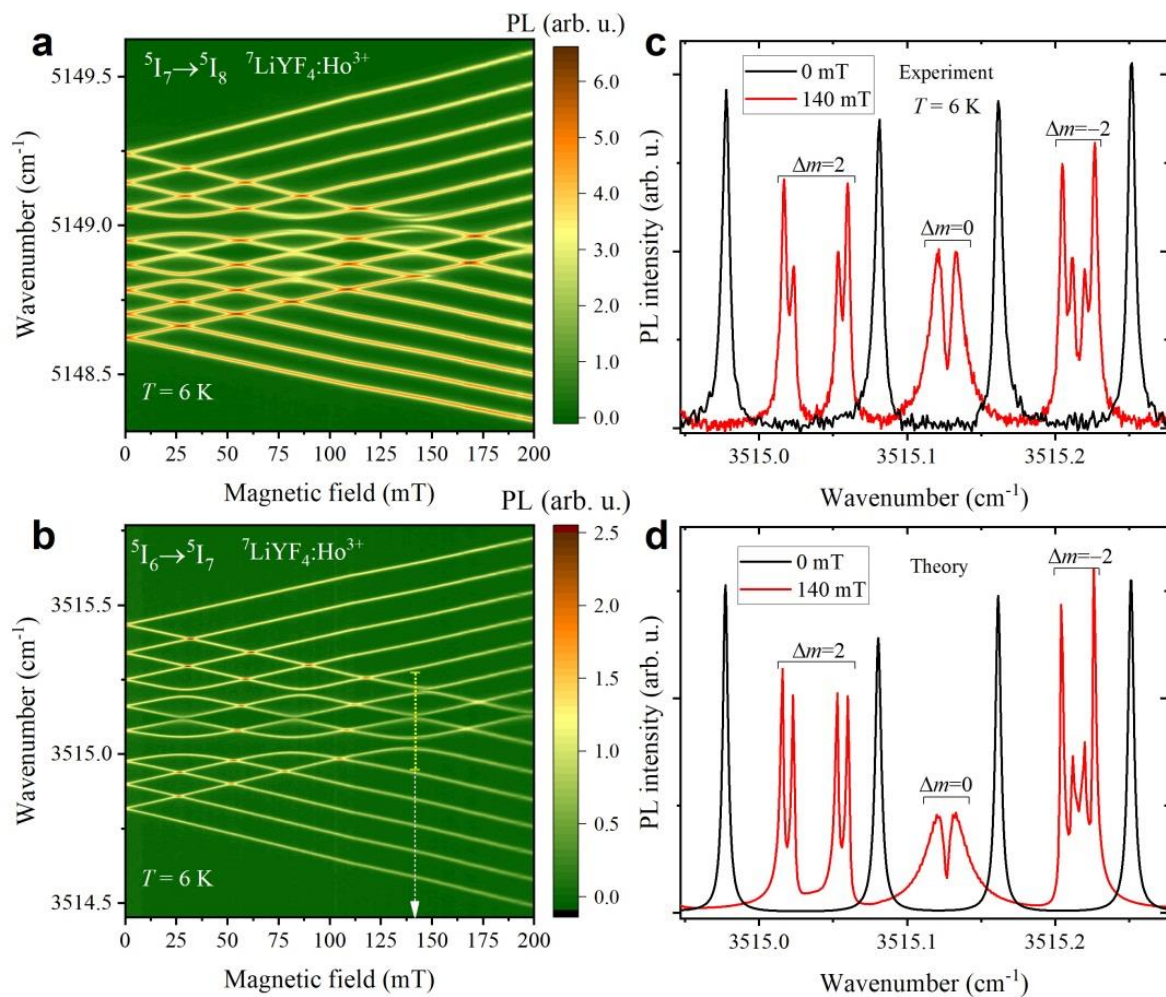


Рис. 1. Карты интенсивности люминесценции в шкале магнитное поле – волновые числа для переходов (а) – ${}^5I_7 \Gamma_{34} (5155.75) \rightarrow {}^5I_8 \Gamma_2 (6.85)$ и (б) – ${}^5I_6 \Gamma_2 (8670.9) \rightarrow {}^5I_7 \Gamma_{34} (5155.75)$ в ${}^7\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (0.1%) при 10 К. Наблюдаются антипересечения сверхтонких уровней; (с) – экспериментальный и (д) – модельный фрагменты спектра, соответствующие переходу ${}^5I_6 \Gamma_2 (8670.9) \rightarrow {}^5I_7 \Gamma_{34} (5155.75)$ ${}^7\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (0.1 %) в нулевом магнитном поле (черный цвет) и в поле 140 мТл (красный цвет).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант №19-72-10132).

1. D.Yu et al., Light Sci. Appl. **10**, 236 (2021).
2. C.W. Thiel, Th. Böttger, R.L. Cone, J. Luminescence **131**, 353 (2011).
3. Kh. Heshami et al., J. Modern Optics **63**, 2005 (2016).
4. R.L. Ahlefeldt, M.R. Hush, M.J. Sellars, Phys. Rev. Lett. **117**, 250504 (2016).
5. R. Akhmedzhanov, Phys. Rev. B **97**, 245123 (2018).
6. J.S. Stuart et al., Phys. Rev. Research **3**, L032054 (2021).
7. K.N. Boldyrev et al., Phys. Rev. B Rap. Comm. **99**, 041105(R) (2019).
8. K.N. Boldyrev, B.Z. Malkin, M.N. Popova, J. Lumin. **247**, 118902 (2022).

ОПТИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКЛИННЫХ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ СО СТРУКТУРОЙ ВОЛЬФРАМИТА

Я.С. Диденко¹, Ю.И. Зими́на¹, К.В. Кулешова¹, Д.А. Лис², О.Н. Лис²,
П.А. Лойко³, С.К. Павлов^{1,2}, К.А. Субботин^{1,2}, А.И. Титов^{1,2}

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

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

³Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique, Université de
Caen Normandie, Caen, France

E-mail: yulia_zimina@inbox.ru

Моноклинные кристаллы со структурой вольфрамиты $MgWO_4$, $ZnWO_4$ и др. как лазерные матрицы характеризуются наличием всех важнейших преимуществ, типичных для кристаллов молибдатов и вольфрамовых других структурных классов (шеелиты, кристаллы типа КGW), а именно: высокими пиковыми сечениями спектральных полос РЗИ и существенным неоднородным уширением этих полос. Но, помимо этого вольфрамиты характеризуются также сильными кристаллическими полями на РЗИ, что дает значительное штарковское расщепление основного состояния. Это очень важно для РЗИ-активаторов, работающих по трехуровневой или квази-трехуровневой схемам. Также эти кристаллы характеризуются высокими (по меркам молибдатов и вольфрамовых) коэффициентами теплопроводности, в ряде случаев приближающимися к таковым для кристаллов ИАГ и YVO_4 . В последнее время продемонстрированы обнадеживающие результаты лазерных генерационных испытаний данных кристаллов, легированных целым рядом РЗИ-активаторов.

Для проектирования лазерных систем необходимо знать оптические, термооптические и механические прочностные характеристики активных лазерных сред. В случае низкосимметричных кристаллов – для различных направлений. Вместе с тем упомянутые данные даже для номинально-чистых кристаллов $MgWO_4$, $ZnWO_4$, имеющиеся в доступной литературе, весьма скудны, а для кристаллов с существенными концентрациями активаторов и зарядовых компенсаторов – практически отсутствуют.

В докладе приводятся и анализируются измеренные нами дисперсии и температурные коэффициенты главных показателей преломления n_p , n_m и n_g , а также микротвердости и трещиностойкости при индентировании вдоль главных кристаллографических осей для кристалла номинально-чистого $MgWO_4$, выращенного из раствора в расплаве (методом TSSG), а также для нескольких кристаллов $Yb,Li:ZnWO_4$ с различными концентрациями иттербия и лития, выращенных методом Чохральского.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки (грант ФССМ-2020-0005).

ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТОГО СТЕКЛА СОСТАВА $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$

Е.Н. Лашманов

Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,

Нижний Новгород

E-mail: elashihps@gmail.com

Стекло состава $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ является перспективным материалом для фотоники ближнего и среднего ИК-диапазона ввиду широкого интервала прозрачности вплоть до 12 мкм, высокой нелинейности оптических свойств и низкой склонности к кристаллизации. Примесями, лимитирующими оптические свойства стекла этого состава, являются: водород в форме Se-H и Ge-H групп; OH группы и молекулярная вода; кислород в форме Ge-O, Si-O, Se-O. В некоторых коммерческих образцах стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ содержание примеси Se-H и Ge-O может достигать 10 ppm(at) и 5 ppm(wt) соответственно. Применение новых подходов для получения стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ с концентрацией оптически активных примесей ниже, чем в коммерчески доступных образцах является актуальной задачей.

Целью исследования было разработать способ получения объемных образцов стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ с содержанием примеси водорода в форме Se-H групп < 2 ppm (at), и примеси кислорода в форме Ge-O < 1 ppm (wt).

Предложены два способа получения стекла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$, исключающих высокотемпературную дистилляционную очистку стеклообразующего расплава, приводящую к увеличению загрязняющего действия материала аппаратуры. Первый способ включает в себя предварительное прокалывание гранул германия при 700 °С для удаления с их поверхности пленки оксида германия (II) с последующей загрузкой навески германия и сурьмы на воздухе в ампулу для синтеза и двойную дистилляционную очистку селена в процессе загрузки в ампулу с шихтой. Преимущество этого метода заключается в возможности получения массивных образцов диаметром до 40 мм и длиной до 200 мм с содержанием примеси Se-H менее 2 ppm(at) и кислорода в форме оксида германия менее 1 ppm(wt). Второй метод основан на очистке компонентов шихты на этапе пропускания паров селена над германием и сурьмой в динамическом вакууме в присутствии алюминия, который выступает в качестве геттера. Добавление геттера позволяет перевести кислородсодержащие примесные вещества в легкоудаляемую форму. Предложенный способ позволяет получать образцы с содержанием примеси Se-H ниже 2 ppm(at) и примеси Ge-O ниже 0.1 ppm(wt).

Проведен синтез серии образцов стекол состава $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$. Методом АЭС-ИСП определен макросостав образцов и концентрация примесей металлов в них. Методом ИК-Фурье анализа установлен уровень пропускания полученных образцов в области 1-12 мкм, который превышает 60 % при толщине исследуемого образца 10 мм. Содержание примеси Se-H в образцах составило < 2 ppm(at), примеси Ge-O < 0.05 ppm(wt).

Работа выполнена при поддержке национального проекта «Наука и университеты» (государственное задание № 075-03-2021-412).

ИСТОЧНИК ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРА НА ДВУХВАЛЕНТНЫХ ИОНАХ ХРОМА В КРИСТАЛЛЕ ZnSe

П.Г. Зверев^{1,2}, А.А. Сироткин², И.В. Смирнов^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

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

E-mail: SmirnovIgV@mpei.ru

На сегодняшний день одной из актуальных задач лазерной физики является разработка новых эффективных когерентных источников для среднего ИК диапазона, в частности в области 2.5 мкм [1]. Внимание к подобным системам обусловлено тем, что в данной части спектра находятся основные линии поглощения воды и углеводородов, а также других органических и неорганических соединений важных для задач биологии и медицины [2]. Кристалл ZnSe:Cr²⁺ имеет широкие полосы люминесценции и поглощения и позволяет получить генерацию с плавной перестройкой длины волны в области 1.4 – 2.1 мкм.

В работе получена генерация лазера на кристалле на длине волны 2494 нм при накачке твердотельным лазером КТР/YAG:Nd³⁺ с поперечной диодной накачкой внутрирезонаторной параметрической генерацией и перестраиваемой длиной волны 2000 – 2140 нм. Благодаря плавной перестройке длины волны лазера удалось добиться оптимального поглощения накачки двухвалентными ионами хрома. Средняя мощность ZnSe:Cr²⁺ лазера при частоте повторения импульсов 500 Гц достигала 28 мВт при накачке 280 мВт и длиной волны 2 мкм. Максимальный КПД ZnSe:Cr²⁺ лазера по падающей энергии составил 10 %. На рис. 1 показано как в процессе преобразования частоты длительность импульса генерации уменьшалась от 50 нс (1064 нм) до 12 нс (2 мкм) и 9 нс (2494 нм). Обсуждается возможность увеличения выходной мощности за счет повышения мощности источника накачки.

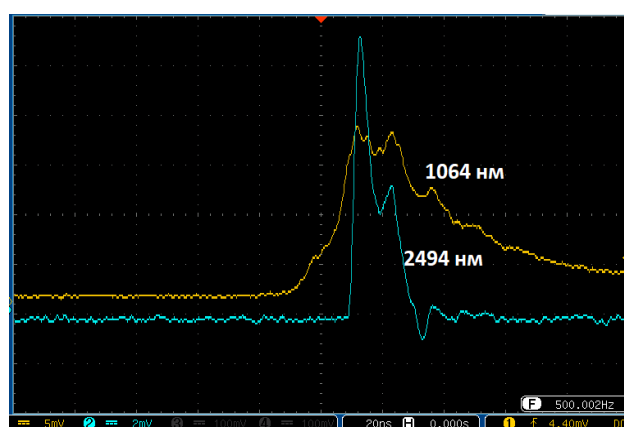


Рис. 1. Оциллограммы длительностей импульсов.

1. K. Scholle, *2 μm laser sources and their possible applications*, Croatia: INTECH, 2010.
2. D.J. Paynter, *Measurements and interpretations of the water vapour continuum at near infrared wavelengths*, PhD thesis, University of Reading, 2008.

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ $ZrO_2-Y_2O_3-Pr_2O_3$

Н.А. Ларина¹, Е.Е. Ломонова², Д.А. Морозов¹, П.А. Рябочкина¹
¹Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарева, Саранск

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: dimosmoros@mail.ru

Лазерная генерация в видимом диапазоне спектра получена на многих кристаллах и стеклах, легированных ионами Pr^{3+} [1-3]. В настоящее время является актуальной задача поиска активных лазерных сред, генерирующих излучение в видимой области спектра, перестраиваемых по частоте. В качестве потенциальных активных сред для получения перестраиваемой лазерной генерации являются кристаллы $ZrO_2-Y_2O_3-Pr_2O_3$.

Целью настоящей работы являлось исследование спектрально-люминесцентных характеристик кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3$, легированных ионами празеодима.

Кристаллы твердых растворов $(ZrO_2)_{0.803}(Y_2O_3)_{0.190}(Pr_2O_3)_{0.007}$, $(ZrO_2)_{0.804}(Y_2O_3)_{0.193}(Pr_2O_3)_{0.003}$ были получены методом направленной кристаллизации расплава в «холодном» тигле.

Анализ спектров поглощения данных кристаллов выявил в них наличие как ионов Pr^{3+} , так и ионов Pr^{4+} . Из анализа спектров люминесценции, обусловленных оптическими переходами $^3P_0 \rightarrow ^3H_{4,5}$, $^3P_0 \rightarrow ^3F_{2,3,4}$, $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$ и $^1D_2 \rightarrow ^3H_4$ ионов Pr^{3+} (рисунок 1 (а)) и кинетик затухания люминесценции ионов Pr^{3+} с уровня 3P_0 и 1D_2 (рисунок 1 (б)) выявлено наличие процессов взаимодействия ионов Pr^{3+} , обусловленных кросс-релаксацией ($^1D_2 \rightarrow ^1G_4 \rightarrow ^3H_4 \rightarrow ^3F_4$).

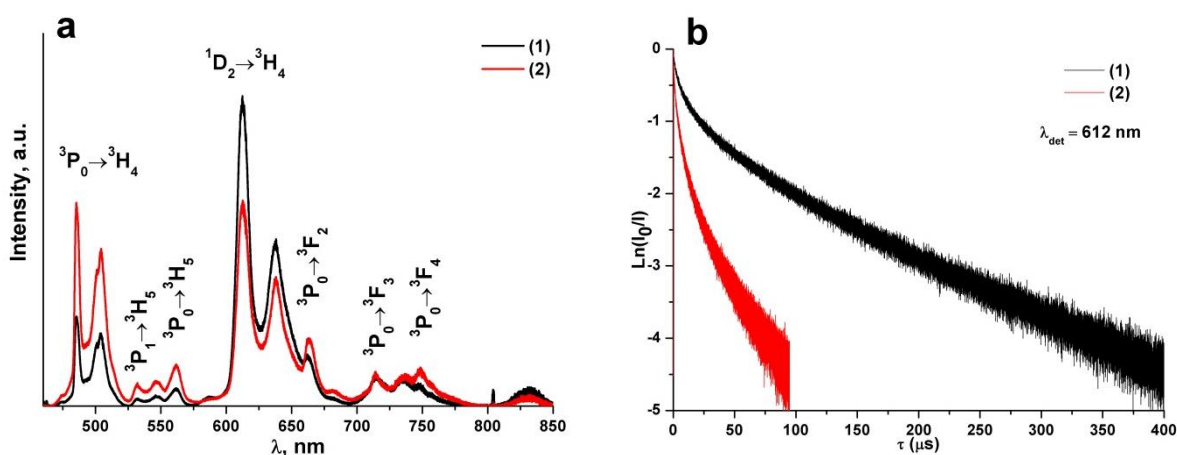


Рис. 1. (а) – спектры люминесценции и (б) – кинетики затухания люминесценции с уровня 1D_2 ионов Pr^{3+} в кристаллах: (1) - $(ZrO_2)_{0.802}(Y_2O_3)_{0.195}(Pr_2O_3)_{0.003}$ и (2) - $(ZrO_2)_{0.805}(Y_2O_3)_{0.188}(Pr_2O_3)_{0.007}$.

1. M. Fibrich et al., Appl. Phys. B. **97**, 363 (2009).
2. X.D. Li et al., Laser Phys. Lett. **8**, 791 (2011).
3. A. Sottile et al., Optics Letters **40**, 1992 (2015).

ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x}$ И $(Pb_{1-x}Cd_x)_{0.7}Ho_{0.3}F_{2.3}$ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СПЕКТРАЛЬНО- ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ

И.И. Бучинская, Д.Н. Каримов
Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова,
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва
E-mail: buchinskayaii@gmail.com

Твердотельные лазеры, работающие в спектральной области 2 мкм, имеют широкое применение в фотонике. Для визуализации этого излучения особенно удобен ион Ho^{3+} , позволяющий обеспечить эффективную видимую ап-конверсионную люминесценцию при возбуждении (переход $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$) в диапазоне 1870–2150 нм. Интенсивность такого процесса переноса энергии во многом зависит от типа кристаллической матрицы.

Матрицы на основе PbF_2 и CdF_2 мало изучены, в сравнении с другими флюоритовыми кристаллами. Их более узкий фононный спектр существенно снижает вероятность процессов безызлучательной релаксации [1, 2]. На линии ликвидуса твердых растворов $Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x}$ есть точка максимума, а в поле твердых растворов системы $PbF_2-CdF_2-HoF_3$ – состав с конгруэнтным характером плавления (точка типа «седло») (рис. 1(а)), которые позволяют выращивать направленной кристаллизацией из расплава однородные кристаллы [3, 4]. Они и стали объектом наших исследований.

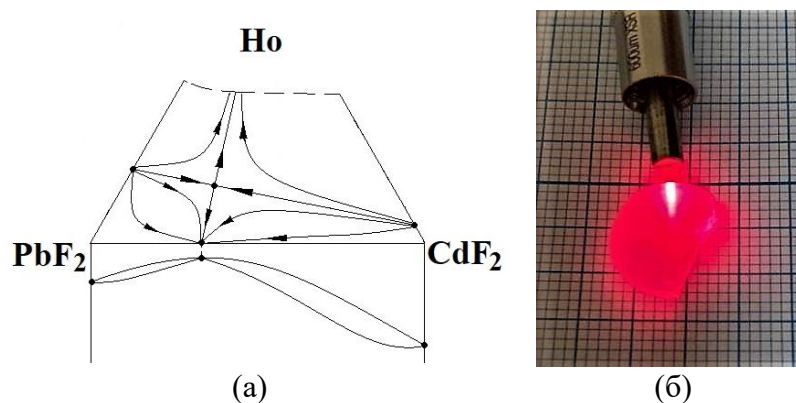


Рис. 1. Схема фазового портрета кристаллизации твердых растворов в системе $PbF_2-CdF_2-HoF_3$ (а); видимая люминесценция кристалла при возбуждении 2 мкм лазером (б).

Методом Бриджмена выращены кристаллы двойных и тройных твердых растворов. Установлено, что наличие интенсивной люминесценции в области 650 нм (рис. 1(б)) позволяет применять кристаллы $Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x}$ и $(Pb_{1-x}Cd_x)_{0.7}Ho_{0.3}F_{2.3}$ для визуализации ИК лазерного излучения. В докладе приводятся подробности технологического процесса и спектрально-люминесцентные характеристики полученных кристаллов.

1. А.П. Савикин и др., Письма в ЖТФ **42**, 47 (2016).
2. P. Zhang et al., Opt. Lett. **39**, 3942 (2014).
3. П.П. Федоров и др., ЖНХ **41**, 464 (1996).
4. П.П. Федоров, И.И. Бучинская, Успехи химии **81**, 1 (2012).

УПРАВЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЕМ ОТРАЖЕННОГО ГАУССОВА ПУЧКА ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

И.А. Глухов^{1,2}, Ю.С. Дадоев^{1,2}, С.Г. Моисеев^{1,3}, F.F.L. Ventivegna²

¹Ульяновский государственный университет, Ульяновск

²Национальная инженерная школа Бреста (ENIB), Плузане, Франция

³Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники

им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

E-mail: glukhov91@yandex.ru

Исследовано изменение профиля двумерного s -поляризованного фазомодулированного гауссова пучка электромагнитного СВЧ излучения при отражении от диэлектрической изотропной пластины. Модуляция гауссова пучка имеет параболическую зависимость от координаты вида $\exp(-i\xi x'^2 / w_0^2)$, где x' – поперечная координата, ξ – параметр модуляции фазы, w_0 – радиус пучка в перетяжке. Фазовая модуляция достигается за счёт пропускания немодулированного гауссова пучка сквозь параболическую преломляющую линзу или пластину с параболическим градиентом показателя преломления.

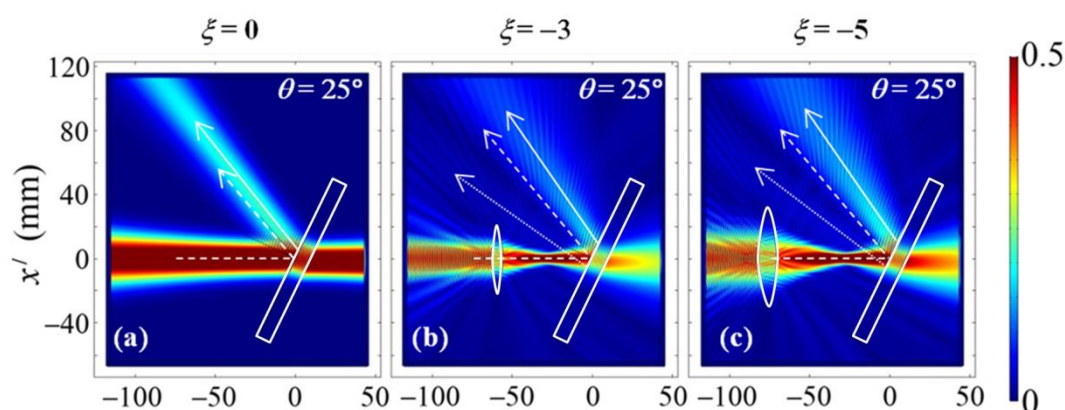


Рис. 1. Результаты численного моделирования отражения фазомодулированного гауссова пучка для различных значений параметра модуляции фазы ξ . Штриховыми стрелками показано направление зеркального отражения. Сплошными стрелками показаны наиболее интенсивные рефлексии.

Проведен аналитический и численный анализ влияния параметра модуляции фазы на пространственное и угловое продольные смещения отражённого пучка (рис. 1). При наклонном падении максимум интенсивности отраженного пучка имеет положительное смещение, величина которого сопоставима либо превышает сдвиг Гуса-Хенхен от полубесконечной среды. Найдены значения параметров, при которых продольное смещение отражённого пучка в 2.5 раза больше смещения немодулированного пучка при том же угле падения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Conseil Régional de Bretagne, France (PhotoMag); École Nationale d'Ingénieurs de Brest, France, Collège de France (PAUSE), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

ПОЛУЧЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ KDP ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБОРИТНОЙ ОПТИКИ

А.Н. Севрюкова, В.В. Грибко, А.П. Прохоров
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: gribko@ipfran.ru

Для преобразования лазерного излучения в мощных лазерных установках, таких как УФЛ-2М, NIF, MJ, необходимы оптические элементы со световой апертурой ~ 40 см. В настоящий момент безальтернативным вариантом материала для изготовления крупногабаритных нелинейно-оптических элементов являются кристаллы KDP.

В работе методом скоростного выращивания профилированных моносекториальных кристаллов были получены кристаллы KDP размером $45 \times 50 \times 7$ см³. Была исследована оптическая однородность полученных кристаллов теневым методом на приборе ИАБ-451.

Раствор для выращивания кристаллов был приготовлен из соли KDP (осч.), деионизованной воды с удельным сопротивлением 21 МОм·см. Для уменьшения влияния примесей на процесс роста, а также для управления отношением скоростей роста граней (100) и (101) кристалла добавляется ортофосфорная кислота. Качество раствора определялось по величине «мертвой зоны» на характеристических кривых. Примесный состав раствора определялся атомно-эмиссионным методом. Концентрация основных примесей в используемых растворах Al < 0.08 ppm, Ba < 0.005 ppm, Mg \approx 0.011 ppm, Si \approx 4.3 ppm, Fe \approx 0.054 ppm, Na \approx 1.5 ppm, Zn \approx 0.018 ppm.

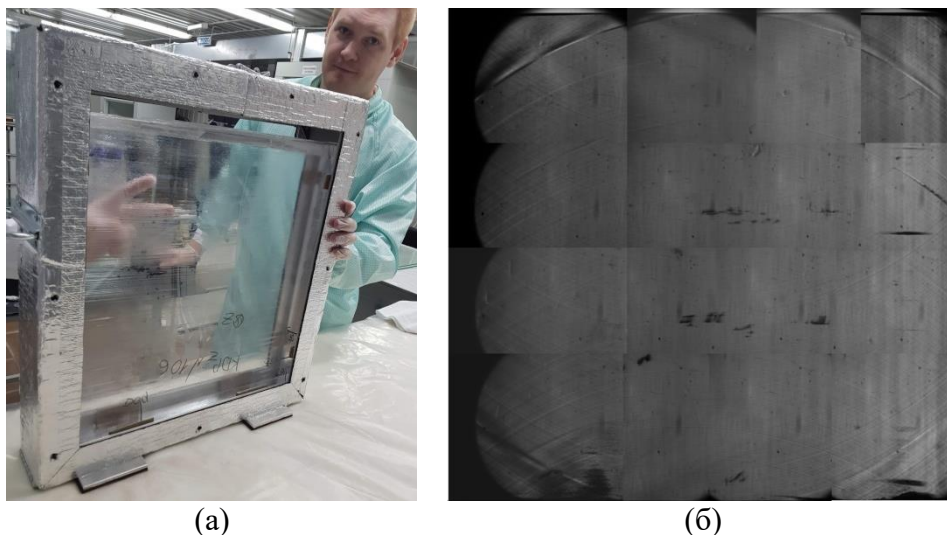


Рис. 1. (а) – KDP кристалл размером $45 \times 50 \times 7$ см³; (б) – теневая картина кристалла.

Скорость роста полученных кристаллов находилась в интервале от 11 до 15 мм/сут. при относительном пересыщении 5-7 %. Как видно из рис.1 теневая картина имеет достаточно однородный вид, что указывает на высокую оптическую однородность. Видимые дефекты на теневой картине являются искажением поверхности кристалла возникшие при его шлифовке.

LASER PHYSICS AND LASER MATERIALS

INVESTIGATION OF LUMINESCENT MATERIALS USING VACUUM ULTRAVIOLET EXCITATION OF SYNCHROTRON RADIATION

S.A. Artemov¹, E.E. Lomonova², V. Pankratov³, P.A. Ryabochkina¹,
N.V. Sidorova¹

¹*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

³*Institute of Solid-State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia*

E-mail: vpank@latnet.lv

The tuneability of SR and its inherent well-defined time structure makes it particularly well suited for time-resolved luminescence studies. Nevertheless, it took more than 20 years after SR discovery when the pioneering work was published in 1970 reporting the luminescence spectroscopy experiments under SR excitations. The measurements were performed at TANTALUS storage ring (Wisconsin, USA). Afterwards, luminescence activities at other synchrotron centers around the world started. Since 1970 luminescence spectroscopy experiments have been carried out for instance at Tokyo synchrotron (Japan), at synchrotron center of Lebedev Physical Institute (Moscow, USSR), at ACO storage ring (Orsay, France), MAXLAB (Lund, Sweden), UVSOR (Okazaki, Japan) and others. However, the most successful and significant luminescence experiments under SR were performed at SUPERLUMI setup. The SUPERLUMI setup was constructed and developed as a user facility in 1981 at DORIS III storage ring of HASYLAB at DESY (Hamburg, Germany) and it was a flagship experiment for three decades [1].

In the present lecture, after brief introduction about SR, two experimental setups from European synchrotron centers intended for the optical and luminescence spectroscopy research under vacuum ultraviolet (VUV) excitations of SR will be demonstrated. The first setup is the FINESTLUMI experimental end station that recently was designed, constructed and installed on the Finnish-Estonian beamline (FinEstBeAMS) of the 1.5 GeV storage ring at MAX IV Laboratory (Lund, Sweden) [2-4]. The second setup is the new SUPERLUMI end station which is upgraded and relocated to the PETRA III storage ring of the DESY synchrotron (Hamburg, Germany) [5]. The past development and the present technical parameters of both experimental stations are described. The comparison of the experimental parameters of the FINESTLUMI and new SUPERLUMI setups will be demonstrated. The experimental possibilities and limitations of each of the setups as well as the recent luminescence experiments performed therein are briefly discussed.

Special attention in the presentation will be focused on the recent results obtained for undoped and rare-earth ions (Er^{3+} , Ho^{3+} , Eu^{3+} , Nd^{3+}) doped yttria stabilized zirconia (YSZ) single crystals and nanopowders. The main goal of the study of YSZ is to investigate intrinsic defects by means of selective excitation in UV-VUV spectral range. Taking into account that the YSZ belongs to the class of wide bandgap materials such excitation is absolutely necessary and SR is the best excitation source in this range. Both emission and excitation spectra

of intrinsic defects in YSZ are represented as a number of overlapped broad bands. Therefore the measurement of excitation-emission maps was applied to distinguish intrinsic defect states in YSZ. Figure 1 exhibits a typical example of the excitation-emission map for one of rare-earth doped YSZ samples.

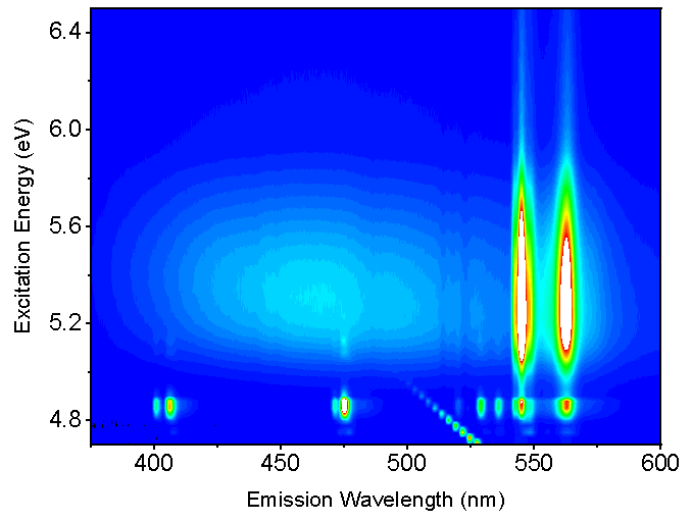


Fig. 1. The excitation-emission map measured at 10 K for Er^{3+} doped YSZ crystal.

The detailed analysis of the defect-related emission in the YSZ single crystals having a different yttrium content as well as in the YSZ crystals doped by various rare-earth ions, will be demonstrated on the basis of the theoretical calculations known in literature [6, 7], as well as taking into account the recent experimental data on the ionic conductivity of YSZ [8]. The defects responsible for the broad emission bands in YSZ single crystals observed upon excitation of SR will be elucidated and discussed.

1. G. Zimmerer, *Radiation Measurements* **42**, 859 (2007).
2. R. Pärna et al., *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A* **859**, 83 (2017).
3. V. Pankratov et al., *Radiation Measurements* **121**, 91 (2019).
4. K. Chernenko et al., *J. Synchrotron Rad.* **28**, 1620 (2021).
5. V. Pankratov, A. Kotlov, *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B* **474**, 35 (2020).
6. T.V. Perevalov, D.R. Islamov, *ECS Transactions* **80**, 357 (2017).
7. D.R. Islamov et al., *Materialia* **15**, 100979 (2021).
8. S.A. Artemov et al., *J. Alloys Compd.* **870**, 15939 (2021).

HIGH-RESOLUTION LUMINESCENT BROADBAND SPECTROSCOPY OF RARE-EARTH CRYSTALS

K.N. Boldyrev, M.N. Popova

Institute of Spectroscopy of RAS, Troitsk, Russia

E-mail: kn.boldyrev@gmail.com

Crystals doped with rare-earth (RE) ions exhibit very narrow homogeneous and inhomogeneous linewidths of the $4f^N-4f^N$ optical transitions, since the $4f^N$ electronic shell is well shielded from the crystalline environment by the filled 5s and 5p shells. The narrow-line spectra of transitions within the $4f^N$ shell of triply ionized RE elements cover the entire visible and infrared range. RE-doped materials are widely used as laser media, phosphors, scintillators, in solar cells, etc. Nowadays, the RE-based luminescence thermometry is successfully developing, demonstrating a wide working temperature range, high thermal sensitivity and spatial resolution [1]. Over the past decade, significant progress has been achieved in the application of RE-doped crystals for quantum information processing, which is based on the use of electronic-nuclear hyperfine levels [2-8]. Information on the hyperfine and superhyperfine interactions, isotopic effects, inhomogeneous line shapes, and random lattice strains in a crystal is essential for applications in modern quantum technologies. It can be acquired using high-resolution optical spectroscopy.

A series of high-resolution studies of RE materials has been performed using absorption or photoluminescence excitation spectroscopies. Hyperfine, superhyperfine, and isotope structures, as well as specific line shapes imposed by random lattice strains and the hyperfine level anticrossings in a magnetic field were observed in optical absorption spectra of the RE-doped crystal $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$. We are not aware of any broad-band high-resolution study of the luminescence spectra of RE-doped crystals, as well as of a resolved hyperfine structure in these spectra (see fig 1). For this, an experimental setup was designed, including a high-resolution spectrometer, a vacuum luminescent module, and a signal receiving module, a cryo-installation was made with the possibility of cooling to a temperature of 2.8 K, and magnetic assemblies were calculated and fabricated with the possibility of applying magnetic fields up to 1 T. The luminescence spectra offer additional possibilities, such as, e.g., the study of very small and/or highly diluted samples or the development of new types of sensitive sensors. Here, we present the results of a high-resolution study of broadband photoluminescence (PL) spectra of $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$ crystals in a magnetic field.

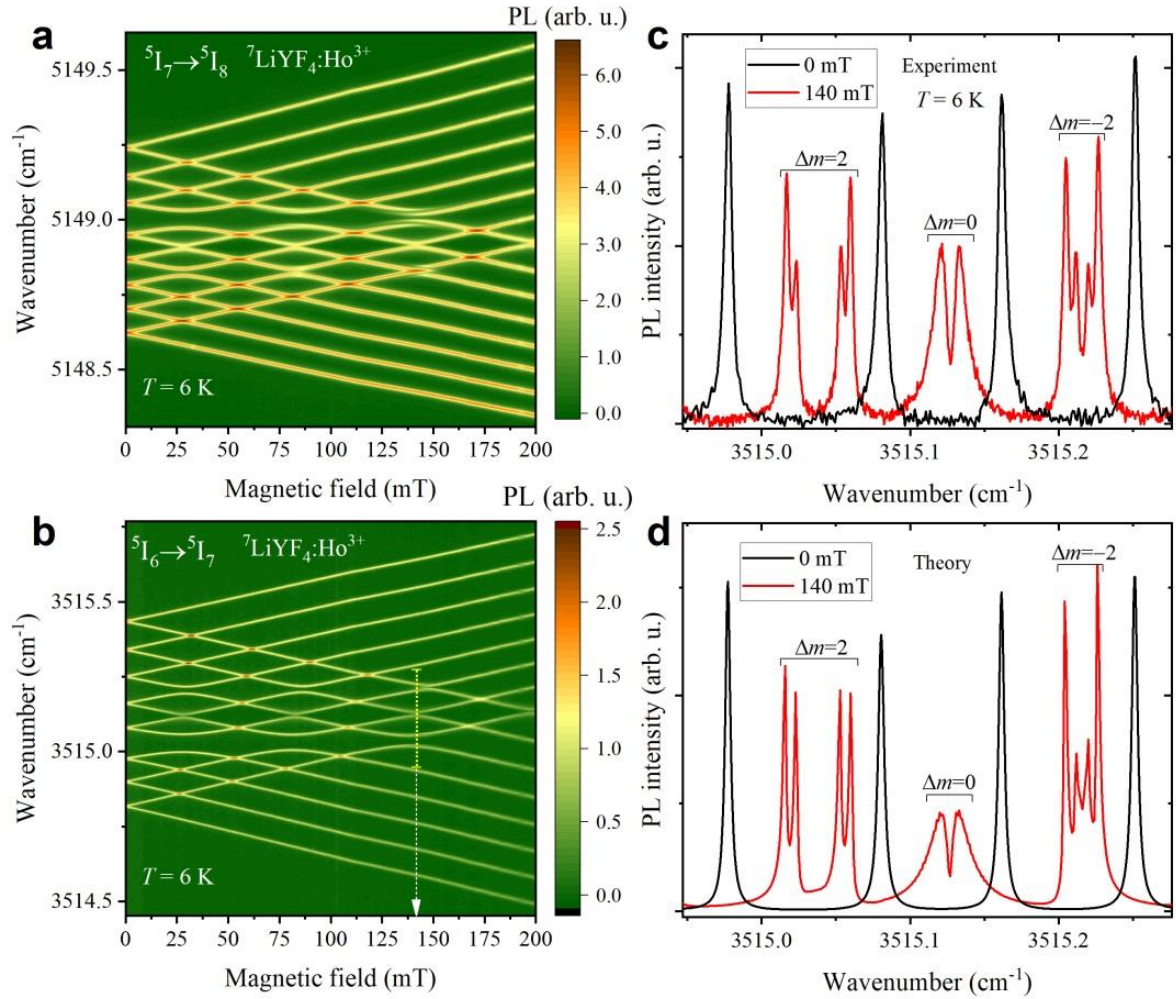


Fig. 1. Luminescence intensity maps in the magnetic-field – wavenumber scale for the (a) – ${}^5I_7\Gamma_{34}(5155.75) \rightarrow {}^5I_8\Gamma_2(6.85)$ and (b) – ${}^5I_6\Gamma_2(8670.9) \rightarrow {}^5I_7\Gamma_{34}(5155.75)$ transitions in ${}^7\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (0.1%) at 10 K. Anticrossings of the hyperfine levels are observed; (c) – experimental and (d) – simulated fragment of the spectrum corresponding to the ${}^5I_6\Gamma_2(8670.9) \rightarrow {}^5I_7\Gamma_{34}(5155.75)$ transition of ${}^7\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (0.1%) in a zero magnetic field (in black) and in the field of 140 mT (in red).

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 19-72-10132).

1. D.Yu et al., Light Sci. Appl. **10**, 236 (2021).
2. C.W. Thiel, Th. Böttger, R.L. Cone, J. Luminescence **131**, 353 (2011).
3. Kh. Heshami et al., J. Modern Optics **63**, 2005 (2016).
4. R.L. Ahlefeldt, M.R. Hush, M.J. Sellars, Phys. Rev. Lett. **117**, 250504 (2016).
5. R. Akhmedzhanov, Phys. Rev. B **97**, 245123 (2018).
6. J.S. Stuart et al., Phys. Rev. Research **3**, L032054 (2021).
7. K.N. Boldyrev et al., Phys. Rev. B Rap. Comm. **99**, 041105(R) (2019).
8. K.N. Boldyrev, B.Z. Malkin, M.N. Popova, J. Lumin. **247**, 118902 (2022).

OPTICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MONOCLINIC LASER CRYSTALS WITH THE WOLFRAMITE STRUCTURE

Ya.S. Didenko¹, K.V. Kuleshova¹, D.A. Lis², O.N. Lis², P.A. Loyko³,
S.K. Pavlov^{1,2}, K.A. Subbotin^{1,2}, A.I. Titov^{1,2}, Y.I. Zimina¹

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

³*Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique, Université de Caen Normandie, Caen, France*

E-mail: yulia_zimina@inbox.ru

Monoclinic crystals with the structure of wolframite MgWO_4 , ZnWO_4 , etc., are characterized as laser matrices by the presence of all the most important advantages typical for crystals of molybdates and tungstates of other structural classes (scheelites, crystals of the KGW type), namely: high peak cross sections of the RE spectral bands and significant inhomogeneous broadening. In addition to this, wolframites are also characterized by strong crystal fields on RE, which provides a significant Stark splitting of the ground state. This is very important property for RE activators operating according to three-level or quasi-three-level schemes. Additionally, these crystals are characterized by high (by the standards of molybdates and tungstates) thermal conductivity coefficients, in some cases approaching those for YAG and YVO_4 crystals. Recently, laser experiments with these crystals doped with a number of RE activators demonstrated promising results.

It is necessary to know the optical, thermo-optical, and mechanical characteristics of active laser media in order to design laser systems. In the case of low-symmetry crystals, these properties differ for each direction. At the same time, information about these properties in the available literature is very scarce, even for nominally pure MgWO_4 and ZnWO_4 crystals, and for crystals with significant concentrations of activators and charge compensators, this information is practically absent.

In this report measured dispersions and temperature coefficients of the main refractive indices n_p , n_m and n_g are presented and analyzed, as well as microhardness and crack resistance during indentation along the main crystallographic axes for a crystal of nominally pure MgWO_4 grown from a flux (by the TSSG method), as well as for several Yb,Li:ZnWO_4 crystals with different concentrations of ytterbium and lithium grown by the Czochralski method.

The work was supported by the Ministry of Education and Science (grant FSSM-2020-0005)

EFFECT OF ADDITIONAL DOPING WITH Li⁺ IONS
ON THE MECHANICAL STRENGTH CHARACTERISTICS
OF THE LASER CRYSTAL Yb:ZnWO₄

Ya.S. Didenko¹, K.V. Kuleshova¹, D.A. Lis², S.K. Pavlov^{1,2}, V.V. Sanina²,
K.A. Subbotin^{1,2}, A.I. Titov^{1,2}, P.A. Volkov³, Yu.I. Zimina¹

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

³*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

E-mail: kristinka-0601@mail.ru

A single crystal of nominally pure ZnWO₄ has long been well known as an effective scintillation and Raman material. Recently, this crystal, activated by various rare-earth ions (RE), has also attracted the attention of researchers as an effective laser medium. In particular, our group recently demonstrated laser generation on a Yb,Li:ZnWO₄ crystal with an output power of up to 3 watts. The problem is that when the RE is introduced into this crystal, its crack resistance drops sharply. This can easily be explained by the fact that with insufficient concentration of the charge compensator of heterovalent entry of the RE into the crystal structure (in this case, Li⁺ ions act as a charge compensator), a noticeable number of zinc vacancies appear in it, weakening the crystal lattice. Therefore, the correct selection of the ratios of the charge concentrations of Yb and Li ions is a key problem in the development of the technology for obtaining a Yb,Li:ZnWO₄ crystal.

To solve this problem, a series of ZnWO₄ single crystals, both nominally pure and doped with various concentrations of Yb³⁺ and Li⁺ ions, was grown by the Chokhralsky method. The actual concentrations of dopants in the crystals were measured by atomic emission spectrometry with induction-coupled plasma, as well as by optical absorption spectroscopy in polarized light (for Yb³⁺). The values of the distribution coefficients of both dopants between the crystal and the melt are estimated, and the mutual influence of dopant concentrations on their distribution coefficients is analyzed. The microhardness and crack resistance of crystals along different crystallographic directions were measured by the indentation method. It is shown that the best mechanical characteristics are demonstrated by crystals grown from melts containing 5-5.5 at. % Yb³⁺ and 8-12 at. % Li⁺.

The work was supported by the Ministry of Education and Science (FSSM-2020-0005 grant and Agreement No. 075-11-2021-070 dated 08/19/2021).

PREPARATION OF HIGH-PURITY Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ GLASS

E.N. Lashmanov

*Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,
Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: elashihps@gmail.com

Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass is a promising material for photonics in the near and mid-IR range due to a wide transparency range up to 12 μm, high nonlinearity of optical properties, and low tendency to crystallization. Impurities that limit the optical properties of glass of this composition are: hydrogen in the form of Se-H and Ge-H groups; OH groups and molecular water; oxygen chemically bound to germanium, silicon and selenium. In some commercial samples of Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass, the content of Se-H and Ge-O impurities can reach 10 ppm(at) and 5 ppm(wt), respectively. The use of new approaches for obtaining Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass with a concentration of optically active impurities lower than in commercially available samples is required.

The aim of the study was to develop a method of preparation bulk samples of Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass with the content of hydrogen impurity in the form of Se-H groups < 2 ppm(at), and oxygen impurity in the form of Ge-O < 1 ppm(wt).

Proposed two methods of preparation Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass, excluding high temperature distillation purification of charge which leads to increased contaminating effect of apparatus material. The first technique includes following steps: 1) annealing of Ge granules in silica glass ampule evacuated to 10⁻³ Pa at 700 °C to remove film of germanium oxide (II) from its surface, 2) loading the mixture of germanium and antimony granules in ampule for glass synthesis, 3) double vacuum distillation of selenium which condensed in charge receiver. The advantage of this method is possibility of preparation massive bulk samples of Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass in form of a rod of 40 mm diameter and length of 200 mm with content of Se-H groups lower 2 ppm(at) and oxygen chemically bound to germanium lower 1 ppm(wt). The second method based on the purification of charge components at the stage of passing selenium vapor over germanium and antimony in a dynamic vacuum with addition of aluminum, which acts as a getter. The addition of a getter makes it possible to convert oxygen-containing impurities into an easily removable form. The proposed method can be used to prepare samples of Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass with Se-H impurity content below 2 ppm(at) and Ge-O impurity content below 0.1 ppm(wt).

A series of Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ glass samples has been synthesized. The macrocomposition and the concentration of metal impurities in samples were determined by the AES-ICP method. The level of transmission which exceeds 60 % with a thickness of the studied sample of 10 mm in the region of 1-12 μm was established using the method of IR-Fourier analysis. Prepared bulk samples content hydrogen impurity in the form of Se-H groups below 2 ppm(at), and oxygen chemically bound to germanium below 0.05 ppm(wt).

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (national project «Science and Universities» within the framework of the established Laboratory of high-purity chalcogenide glasses for mid-IR photonics, State task No. 075-03-2021- 412).

EXCITATION SOURCE FOR DIVALENT CHROMIUM ION LASER IN ZnSe CRYSTAL

I.V. Smirnov^{1,2}, A.A. Sirotkin², P.G. Zverev^{1,2}

¹*National Research University «MPEI», Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: SmirnovIgV@mpei.ru

Today, one of the urgent problems of laser physics is the development of new efficient coherent sources for the mid-IR range, in particular, in the region of 2.5 μm [1]. Attention to such systems is due to the fact that in this part of the spectrum there are the main absorption lines of water and hydrocarbons, as well as other organic and inorganic compounds important for biology and medicine [2]. The ZnSe:Cr²⁺ crystal has broad luminescence and absorption bands and makes it possible to obtain lasing with smooth wavelength tuning in the region of 1.4-2.1 μm .

We have obtained the generation of a laser on a crystal at a wavelength of 2494 nm pumped by a solid-state KTP/YAG:Nd³⁺ laser with transverse diode pumping, intracavity parametric generation and a tunable wavelength of 2000-2140 nm. Due to the smooth tuning of the laser wavelength, it was possible to achieve optimal pump absorption by divalent chromium ions. The average power of the ZnSe:Cr²⁺ laser at a pulse repetition rate of 500 Hz reached 28 mW with pumping at 280 mW and a wavelength of 2 μm . The maximum efficiency of the ZnSe:Cr²⁺ laser with respect to the incident energy was 10 %. Figure 1 show how the duration of the generation pulse decreased from 50 ns (1064 nm) to 12 ns (2 μm) and 9 ns (2494 nm) in the process of frequency conversion. The possibility of increasing the output power by increasing the power of the pump source is discussed.

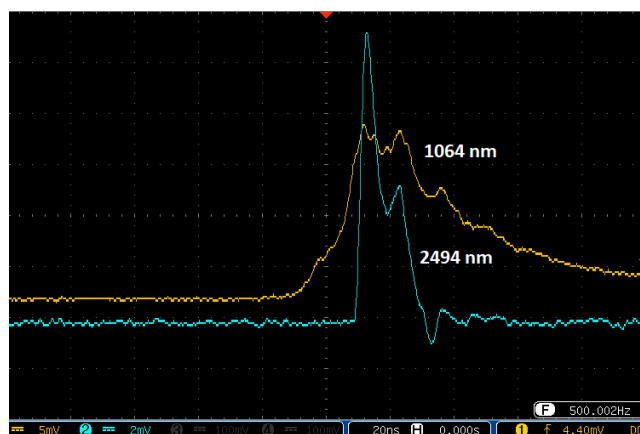


Fig. 1. Oscillograms of pulse durations.

1. K. Scholle, *2 μm laser sources and their possible applications*, Croatia: INTECH, 2010.
2. D.J. Paynter, *Measurements and interpretations of the water vapour continuum at near infrared wavelengths*, PhD thesis, University of Reading, 2008.

SPECTRAL-LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Pr}_2\text{O}_3$ CRYSTALS

N.A. Larina¹, E.E. Lomonova², D.A. Morozov¹, P.A. Ryabochkina¹
¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia
²Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia
 E-mail: dimosmoros@mail.ru

Laser generation in the visible spectral range has been obtained on many crystals and glasses doped with Pr^{3+} ions [1–3]. Currently, the problem of searching for active laser media that generate radiation in the visible region of the spectrum and are tunable in frequency is an urgent task. $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-Pr}_2\text{O}_3$ crystals are potential active media for obtaining tunable laser generation.

The aim of this work was to study the spectral-luminescent characteristics of $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ crystals doped with praseodymium ions.

$(\text{ZrO}_2)_{0.803}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.190}(\text{Pr}_2\text{O}_3)_{0.007}$ and $(\text{ZrO}_2)_{0.804}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.193}(\text{Pr}_2\text{O}_3)_{0.003}$ solid solution crystals were obtained by directional crystallization of the melt in a «cold» crucible.

Analysis of the absorption spectra of these crystals revealed the presence of Pr^{3+} and Pr^{4+} ions in them. Analysis of the luminescence spectra due to the optical transitions ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_{4,5}$, ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{F}_{2,3,4}$, ${}^3\text{P}_1 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ and ${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^3\text{H}_4$ of Pr^{3+} ions (Figure 1 (a)) and the decay kinetics of the luminescence of Pr^{3+} ions from the ${}^3\text{P}_0$ and ${}^1\text{D}_2$ levels (Figure 1 (b)), reveals the presence of interaction processes between Pr^{3+} ions due to cross-relaxation (${}^1\text{D}_2 \rightarrow {}^1\text{G}_4$) \rightarrow (${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$).

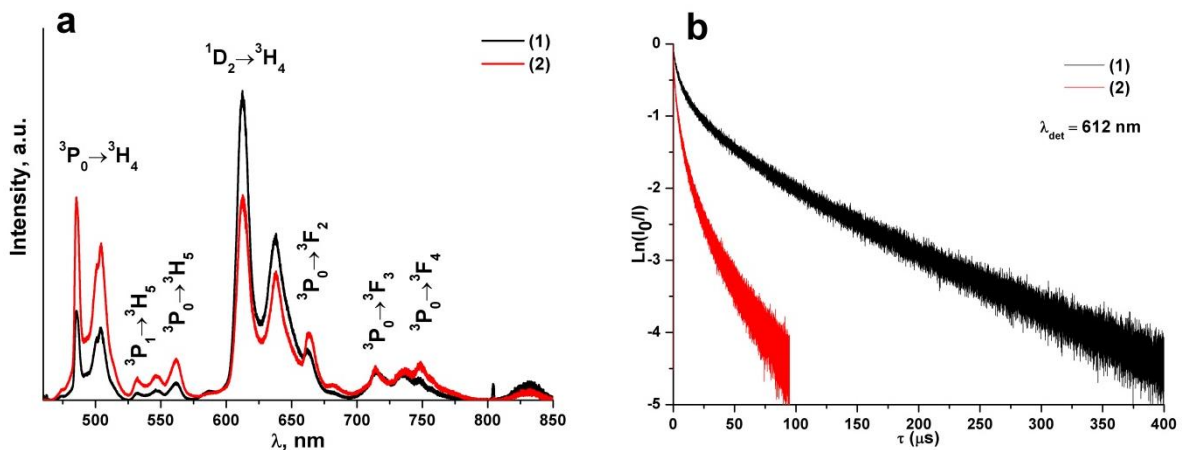


Fig. 1. (a) Luminescence spectra and (b) luminescence decay kinetics from the ${}^1\text{D}_2$ level of Pr^{3+} ions in crystals: (1) - $(\text{ZrO}_2)_{0.802}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.195}(\text{Pr}_2\text{O}_3)_{0.003}$ and (2) - $(\text{ZrO}_2)_{0.805}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.188}(\text{Pr}_2\text{O}_3)_{0.007}$.

1. M. Fibrich et al., Appl. Phys. B. **97**, 363 (2009).
2. X.D. Li et al., Laser Phys. Lett. **8**, 791 (2011).
3. A. Sottile et al., Optics Letters **40**, 1992 (2015).

Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x} AND (Pb_{1-x}Cd_x)_{0.7}Ho_{0.3}F_{2.3} SOLID SOLUTION CRYSTAL GROWTH AND INVESTIGATION OF THEIR SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES

I.I. Buchinskaya, D.N. Karimov

*Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre
«Crystallography and Photonics» of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: buchinskayaii@gmail.com

Solid-state lasers operating in the spectral region of 2 μm are widely used in photonics. The Ho³⁺ ion is especially convenient for visualizing this radiation, since it makes it possible to provide efficient visible up-conversion luminescence upon excitation (⁵I₈ → ⁵I₇ transition) in the range 1870–2150 nm. The intensity of such an energy transfer process largely depends on the type of the crystalline matrix.

Matrices based on PbF₂ and CdF₂ are little studied in comparison with other fluorite crystals. Their narrower phonon spectrum significantly reduces the probability of nonradiative relaxation processes [1, 2]. There are a maximum point on the liquidus line of Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x} solid solutions and a congruent melting composition («saddle» type point) in the solid solutions field of the PbF₂–CdF₂–HoF₃ system (Fig. 1a), which make it possible to grow by directional crystallization from melt homogeneous crystals [3, 4]. They became the object of our research.

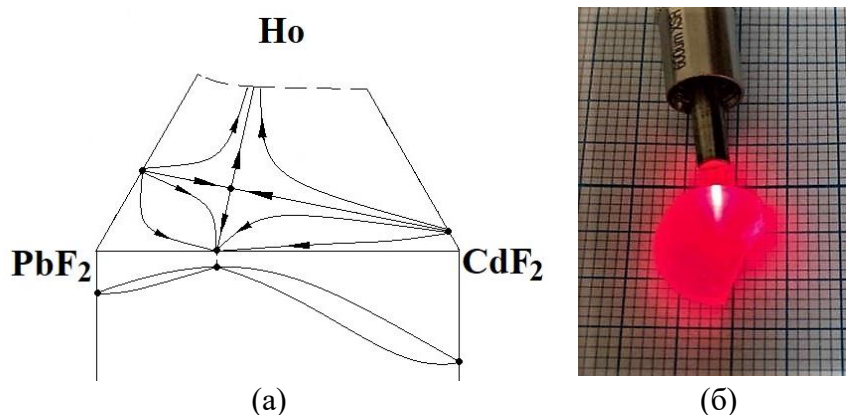


Fig. 1. Schematic phase portrait of solid solutions crystallization in the PbF₂–CdF₂–HoF₃ system (a) and visible luminescence of the crystal upon excitation by a 2 μm laser (b).

Crystals of binary and ternary solid solutions are grown by the Bridgman method. It has been established that the presence of intense luminescence in the region of 650 nm (Fig. 1b) makes it possible to use Pb_{1-x}Ho_xF_{2+x} and (Pb_{1-x}Cd_x)_{0.7}Ho_{0.3}F_{2.3} crystals for visualizing IR laser radiation. The technological process details and the spectral-luminescent characteristics of the obtained crystals are discussed in the report.

1. A.P. Savikin et al., *Tech. Phys. Lett.* **42**, 1083 (2016).
2. P. Zhang et al., *Opt. Lett.* **39**, 3942 (2014).
3. P.P. Fedorov et al., *Zh. Neorg. Khim.* **41**, 464 (1996).
4. P.P. Fedorov, I.I. Buchinskaya, *Russian Chem. Rev.* **81**, 1 (2012).

CONTROL OF THE SHIFT OF A REFLECTED GAUSSIAN BEAM FROM A DIELECTRIC PLATE USING A PHASE MODULATION OF THE BEAM

F.F.L. Bentivegna¹, Y.S. Dadoenkova^{1,2}, I.A. Glukhov^{1,2}, S.G. Moiseev^{2,3}

¹*École Nationale d'Ingénieurs de Brest, Plouzané, France*

²*Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*

³*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Ulyanovsk, Russia*

E-mail: glukhov91@yandex.ru

We study the Goos-Hänchen-like lateral and angular shifts, as well as the modification of the spatial profile, of a two-dimensional *s*-polarized phase-modulated Gaussian beam upon reflection from a dielectric isotropic plate. The phase modulation of the Gaussian beam has a transverse parabolic dependence $\exp(-i\xi x'^2 / w_0^2)$, where x' is the transverse coordinate perpendicular to the average direction of propagation, w_0 is the waist radius, and ξ is a spatial phase modulation parameter. Such a phase modulation can be achieved by using a parable-shaped refractive lenses or a flat, inhomogenous dielectric lamella presenting a parabolic gradient of its refractive index.

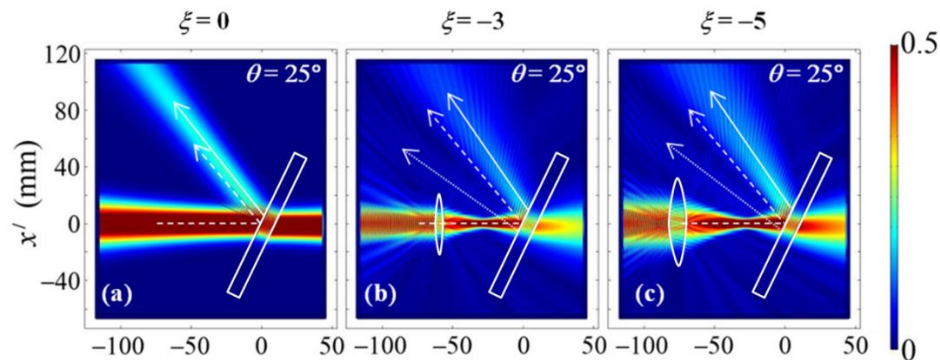


Fig. 1. Numerical simulation of the propagation of a phase-modulated Gaussian beam obtained for several various values of the phase modulation parameter ξ . The direction of the specular reflection is denoted by the dashed arrow. The solid arrow shows the more intense reflected beam.

Figure 1 shows the numerical simulation of the beam propagation and highlights the expected spatial and angular shifts of the reflected beam with respect to the purely specular prediction, as well as the distortion and split in two beams (one more intense than the other) of the reflected wave, for several values of the phase modulation parameter ξ . At oblique incidence, the lateral shift of the brighter reflected beam is comparable to or even exceeds the Goos-Hänchen shift at an interface between semi-infinite media. Moreover, we have determined the range of optimal values of parameter ξ for which the lateral shift of the reflected beam is around 2.5 times larger than the shift of a non-modulated beam at the same angle of incidence.

The work was supported by Conseil Régional de Bretagne, France (PhotoMag); École Nationale d'Ingénieurs de Brest, France, Collège de France (PAUSE), Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

KDP CRYSTALS FOR MANUFACTURING LARGE OPTICS

A.N. Sevryukova, V.V. Gribko, A.P. Prokhorov
Institute of Applied Physics of RAS, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: gribko@ipfran.ru

To convert laser radiation in powerful laser devices, such as UFL-2M, NIF, MJ, optical elements with a light aperture of ~ 40 cm are required. KDP crystals are a non-alternative material for the manufacture of large-sized nonlinear optical elements.

In this work, KDP crystals with a size of $45 \times 50 \times 7$ cm³ were obtained using the method of high-speed growth of profiled monosectoral crystals. The optical homogeneity of the obtained crystals was studied by the shadow method on an IAB-451 instrument.

The solution for growing crystals was prepared from KDP salt (high purity) and deionized water with a resistivity of 21 M Ω ·cm. To reduce the effect of impurities on the growth process, phosphoric acid was added to the solution. Orthophosphoric acid was used to control the ratio of the growth rates of the (100) and (101) faces of the crystal. The quality of the solution was determined by the size of the «dead zone» on the characteristic curves. The impurity composition of the solution was determined by the atomic emission method. Concentration of main impurities in used solutions Al < 0.08 ppm, Ba < 0.005 ppm, Mg \approx 0.011 ppm, Si \approx 4.3 ppm, Fe \approx 0.054 ppm, Na \approx 1.5 ppm, Zn \approx 0.018 ppm.

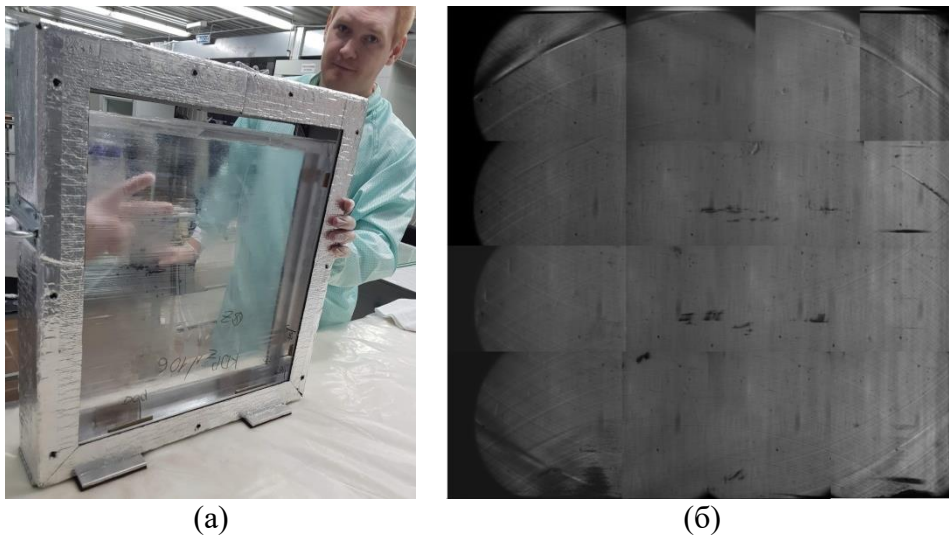


Fig. 1. (a) – KDP crystal size $45 \times 50 \times 7$ cm³; (b) – shadow picture of the crystal.

The crystal growth rate was in the range from 11 to 15 mm/day. The relative supersaturation was 5-7%. As can be seen from Fig. 1, the shadow pattern has a fairly uniform appearance, which indicates a high optical uniformity. Visible defects in the shadow pattern are a distortion of the crystal surface that has arisen during its grinding.

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДА ЭНДОВЕНОЗНОЙ ЛАЗЕРНОЙ КОАГУЛЯЦИИ ВАРИКОЗНО РАСШИРЕННЫХ ВЕН

В.П. Минаев

Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус», Фрязино

E-mail: vMinaev@ntoire-polus.ru

Лечение варикозно расширенных вен методом эндовенозной лазерной коагуляции (ЭВЛК) получило к настоящему времени широкое распространение благодаря высокой эффективности, малой болезненности процедуры для пациента, возможности осуществления в амбулаторных условиях, доступной стоимости оборудования, а также достаточной простоте освоения врачами. Суть этой технологии заключается во введении в патологическую вену световода с последующим извлечением его из вены при подаче через световод лазерного излучения. В результате происходящего при поглощении излучения теплового воздействия запускается процесс фиброзной трансформации, ведущей к замещению вены соединительной тканью и прекращению кровотока через эту вену.

Первая публикация об использовании этой методики была основана на использовании для лечения варикозно расширенных вен излучения с длиной волны 1.06 мкм (лазер на АИГ:Nd) и появилась в 1989 г. [1]. Однако широкое распространение ЭВЛК началось только через 10 лет после публикации [2]. С этого момента начался процесс поиска наиболее подходящих для этой процедуры длин волн рабочего излучения с целью уменьшения болезненности процедуры, а также снижению вероятности рецидивов и нежелательных побочных эффектов. В настоящее время для ЭВЛК используются лазерные излучения с длинами волн в диапазоне от 0.45 до 2 мкм.

Как и в большинстве лазерных медицинских технологий в основе ЭВЛК лежит процесс нагрева биоткани при поглощении ею лазерного излучения. Основными хромофорами (компонентами ткани, поглощающими излучение) при ЭВЛК являются вода и гемоглобин. Причем величина поглощения этих хромофоров по-разному зависит от длины волны лазерного излучения и сильно меняется с ее изменением. На рис. 1 представлены из [3] зависимости от длины волны излучения коэффициентов поглощения μ_a в воде, эмульсии оксигенированных и неоксигенированных эритроцитов, моделирующей кровь с гематокритом $Hct = 33.2\%$, а также растворов окси и дезоксигемоглобина с концентрацией 96.5 г/л, соответствующей $Hct = 33.2\%$ в диапазоне 0.25 – 2.0 мкм. Измерение оптических характеристик непосредственно на крови невозможно из-за быстрого агрегирования ее форменных элементов, что сильно изменяет ее оптические свойства, а использование раствора гемоглобина позволяет сразу измерить коэффициент поглощения, поскольку в нем из-за малости размеров молекул гемоглобина отсутствует рассеяние.

Заметим, что при оценке характера воздействия излучения на биоткани важную роль наряду с коэффициентами поглощения μ_a ,

определяющими распределение поглощаемой энергии между хромофорами, играет эффективный коэффициент ослабления излучения μ_{eff} .

Эффективный коэффициент ослабления учитывает кроме процесса поглощения весьма сильное в случае крови рассеяние излучения и определяет изменение интенсивности при распространении в веществе в соответствии с законом Ламберта-Бугера-Бера:

$$I = I_0 \exp(-\mu_{\text{eff}} \cdot s) \quad (1)$$

где s – толщина слоя вещества, через которое проходит излучение.

То есть (и это важно) именно μ_{eff} определяет толщину слоя, в котором поглощается лазерное излучение.

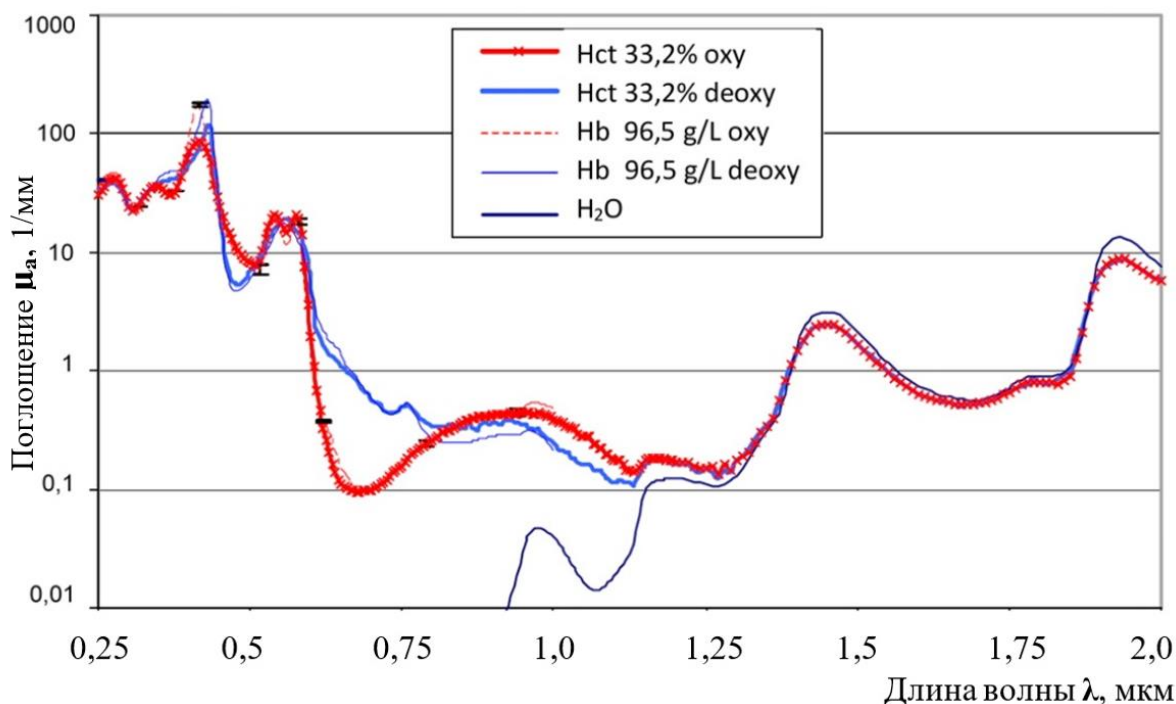


Рис. 1. Зависимости коэффициентов поглощения μ_a в воде, эмульсии эритроцитов, моделирующей кровь с Hct = 33.2% и растворов окси и дезоксигемоглобина.

На рис. 2 и 3 из [4] для двух диапазонов длин волн представлены зависимости коэффициентов поглощения в воде и крови, а также эффективного коэффициента ослабления в крови от длины волны излучения. Стрелками показаны некоторые используемые для ЭВЛК длины волн излучения. Поскольку поглощение в крови вблизи 1 мкм (определяемое в основном поглощением в гемоглобине) превышает для рассматриваемых длин волн поглощение в воде более, чем в 20 раз, такое поглощение называют «гемоглобинпоглощаемым»

На длинах волн 1.3-2 мкм поглощение в воде оказывается близким к поглощению в крови, а вблизи локальных максимумов на длинах волн $\lambda \approx 1.44$ и 1.94 мкм превышает поглощение в крови. При этом эффективный коэффициент ослабления $\mu_{\text{эфф}}$ в крови за счет рассеяния в ней оказывается выше коэффициента поглощения в воде. Излучения с длинами волн, лежащими в этом диапазоне, называют «водопоглощаемыми».

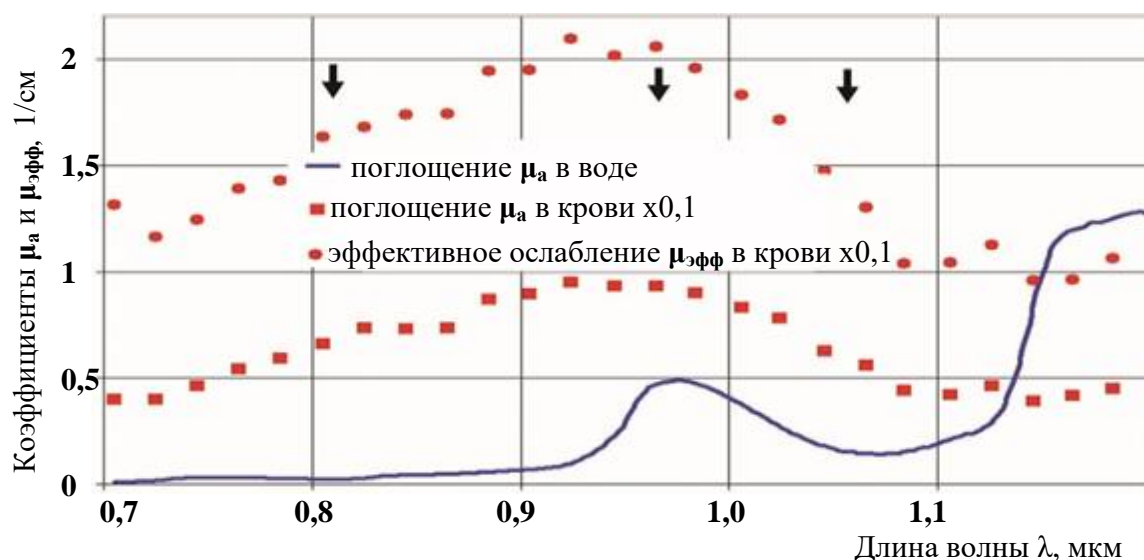


Рис. 2. Поглощение μ_a и эффективное ослабление $\mu_{эфф}$ в эмульсии эритроцитов (модель крови), а также поглощение μ_a в воде для $\lambda = 0.7-1.2$ мкм.

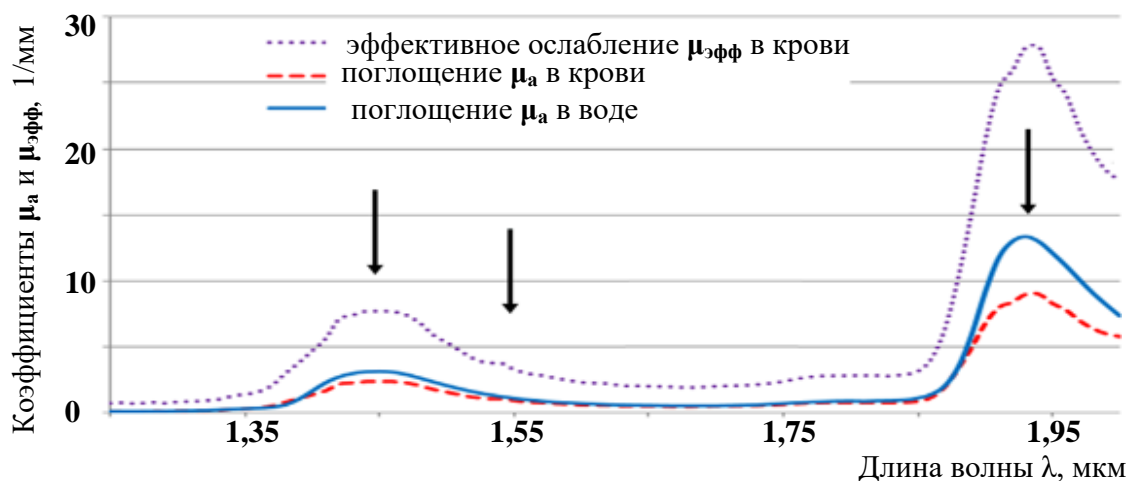


Рис. 3. Поглощение μ_a и эффективное ослабление $\mu_{эфф}$ в эмульсии эритроцитов (модель крови), а также поглощение μ_a в воде для $\lambda = 1.25-2.0$ мкм.

Процесс воздействия излучения при ЭВЛК существенным образом зависит от того, водой или оксигемоглобином оно поглощается. Эта разница была рассмотрена в работе [5]. Дело в том, что в случае преобладания поглощения в гемоглобине именно в нем выделяется тепло, которое затем передается воде. Однако если из-за большой мощности излучения тепло не успевает передаваться воде, происходит разогрев гемоглобина. Когда температура достигает величины около 250 °С, из входящего в органические вещества, углеводорода выгорает водород – происходит обугливание (карбонизация). При этом резко возрастает поглощение, уменьшается область, в которой поглощается излучение и выделяется тепло, а, следовательно, ускоряется процесс разогрева. В результате может происходить локальный разогрев области вблизи выхода излучения вплоть до начала экзотермического процесса горения. По данным R.A.Weiss и Н. Valley в комментарии к [6] температура может возрасти до 1200 °С. То есть происходят процессы, подобные реализуемым в широко используемой технологии рассеивания биоткани

концом световода лазерного скальпеля. При этом если разогретая область коснется стенки вены, то может произойти перфорация стенки с образованием экхимозов и гематом.

Этим не ограничиваются недостатки использования для ЭВЛК гемоглобинпоглощаемого излучения. Это излучение слабо поглощается водой в малонасыщенных гемоглобином стенках вены и в «рубашке» раствора анестетика, образуемой при тумесцентной анестезии, поэтому проходя в прилегающие к вене ткани, оно может вызывать их ожоги и болевой синдром.

При использовании излучения водопоглощаемого диапазона процесс протекает иначе. При нагреве до температуры 100 °С начинается испарение воды, связанное с затратами энергии на преодоление скрытой теплоты парообразования, составляющую значительную величину. Благодаря этому локальная температура долго удерживается на уровне 100°С, которая существенно меньше температуры карбонизации.

В свою очередь, излучение, достигшее стенки вены будет поглощаться содержащейся в ней водой, обеспечивая ее дополнительное тепловое повреждение. То есть будет увеличиваться эффективность использования лазерного излучения. Кроме этого, за счет поглощения в стенке вены и «рубашке» анестетика уменьшается величина мощности излучения, доходящего до прилегающих к вене тканей, что ведет к уменьшению боли и вероятности ожогов.

Вернемся к истории развития метода ЭВЛК.

Немалую роль в распространении метода сыграл переход от громоздких аппаратов на твердотельных лазерах с ламповой накачкой к портативным, надежным и недорогим аппаратам на основе полупроводниковых (диодных) лазеров. В [2] использовалось излучение с длиной волны $\lambda \approx 0.81$ мкм. В дальнейшем начали использовать диодные лазеры с длиной волны $\lambda \approx 0.94-0.98$ мкм [7, 8]. При этом отмечалась [8] решающая роль теплового повреждения венозной стенки в запуске фиброзной трансформации. Результаты, которые обеспечивались при использовании этих длин волн, мало отличались от получаемых с лазерами на 1.06 мкм.

В 2003 г. для осуществления ЭВЛК было предложено использовать излучение с длиной волны 1.32 мкм [9], которое более сильно поглощается водой, то есть относящееся к водопоглощаемому диапазону. Было отмечено, что использование такого излучения позволяет уменьшить необходимую для достижения результата мощность излучения, при этом также уменьшался уровень болевого синдрома и вероятность перфораций стенки вены, ведущих к нежелательным последствиям в виде экхимозов и гематом. Недостатком было то, что в качестве источника такого излучения использовался громоздкий лазер на АИГ:Nd.

В 2007-2008 г. были представлены результаты использования для ЭВЛК излучений с длинами волн 1.47, 1.50 и 1.55 мкм [10-13], также относящихся к водопоглощаемому диапазону, но получаемых с более удобных аппаратов на основе полупроводниковых и волоконных лазеров.

При этом, например, использование излучения с длиной волны 1.56 мкм позволяло по сравнению с 0.97 мкм примерно вдвое снизить используемую при осуществлении ЭВЛК мощность излучения [5].

Доложенные в 2011 г. результаты использования для ЭВЛК лазерного излучения с длиной волны 1.94 мкм [14] показали, что это, еще более сильно поглощаемое водой излучение, позволяет осуществлять процедуру с мощностями, примерно вдвое меньшими по сравнению с излучением 1.47 мкм [15] и меньшим уровнем боли.

Таким образом, представлялось, что надежно обосновано преимущество водопоглощаемых излучений перед гемоглобинпоглощаемыми.

Но тут появились практически не замеченные флебологическим сообществом несколько работ украинских коллег, в частности [16-17], показавших преимущество перед лазерами с длиной волны 0.94 и 1.47 мкм не просто гемоглобинпоглощаемого, а ультра гемоглобинпоглощаемого (рис. 1) излучения полупроводниковых лазеров с длиной волны 0.445 мкм. Так, величины мощностей излучений, использованных для успешного осуществления ЭВЛК в [16] составляли 15-18 Вт при 0.94 мкм, 7-9 Вт при 1.47 Вт и 1-2 Вт (!) при 0.445 мкм. При этом отмечалось, что число нежелательных явлений было близким при использовании излучений с длинами волн 1.47 и 0.445 мкм и заметно меньшим по сравнению с 0.94 мкм. В [17] эти значения составляли соответственно 18-25 Вт (0.94 мкм), 10-15 Вт (1.47 мкм) и 5-7 Вт (0.445 мкм). В этой работе указывается, что количество нежелательных явлений по сравнению с использованием излучения 0.94 мкм уменьшается при использовании излучения 1.47 мкм и становится минимальным при использовании излучения 0.445 мкм.

Кроме этого появилась работа [19], показывающая, что заметного уменьшения реализующей требуемый результат мощности излучения можно добиться при использовании излучения 0.97 мкм со световодом, торец которого предварительно чернился за счет кратковременного касания с деревом. Впрочем, при таком подходе длина волны излучения не играет существенной роли.

Это несколько рушило стройную схему физического обоснования преимущества водопоглощаемого излучения.

Усовершенствование технологии ЭВЛК не ограничивалось только выбором длины волны рабочего излучения. Поскольку основным объектом воздействия, обеспечивавшего запуск фиброзной трансформации, является стенка вены, было предложено использовать световоды с радиальным выводом излучения [18]. При этом предполагалось, что такие световоды обеспечат равномерное тепловое повреждение всей венозной стенки.

В дальнейшем было предложено использовать световоды «two-ring» с двумя кольцевыми выводами излучения (рис. 4).

Недостатком таких световодов была более высокая стоимость по сравнению со световодами с торцевым выводом излучения.

Таким образом, к настоящему времени для лечения варикозного расширения вен используются лазерное излучение с различными длинами волн. И важно отметить, что при правильном выборе энергетических параметров (мощности излучения и скорости вытягивания световода) реализуется эффективное решение проблемы с вероятностью, превышающей 90 % при использовании всех вышеупомянутых излучений,

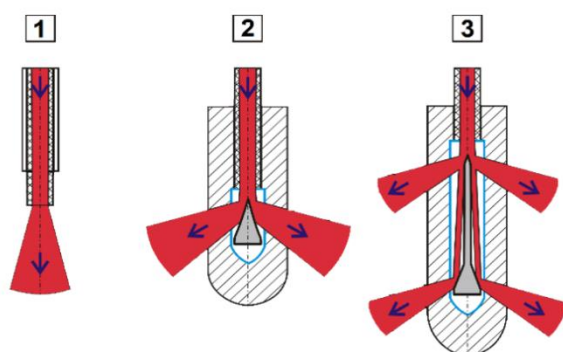


Рис. 4. Световоды с торцевым (1), радиальным (2) выводом излучения и типа «two-ring» (3).

Различия наблюдаются в уровне сопровождающей лечение боли, а, значит и необходимости применения анальгетиков, вероятности появления нежелательных побочных явлений (экхимозов, гематом и парестезий), и длительности послеоперационного выздоровления. И это различие делает целесообразным продолжать исследований, направленных на оптимизацию процедуры.

Необходимым условием для успешного решения этой задачи является понимание биофизических процессов, происходящих при ЭВЛК. Поэтому развитие методики сопровождается до настоящего времени исследованиями на основе физического и математического моделирования этих процессов, основным из которых является процесс теплопереноса к венозной стенке. Причем, именно физическое моделирование играет основную роль, поскольку только оно может дать корректные данные, необходимые для проведения математического моделирования, поскольку неправильная физическая модель, заложенная в основу математического моделирования может дать красивые результаты, не имеющие ничего общего в реально происходящими процессами.

Эти исследования затруднены непрозрачностью крови, в результате чего эти исследования могут проводиться с помощью аппаратов УЗИ и по конечным результатам лазерного воздействия. Получаемые при этом результаты допускают различные толкования, в результате чего исследователи приходят к различным выводам. Так авторы работ [6, 7] приходят к выводу о том, что основным в процессе теплопереноса при ЭВЛК является кипение, вызываемое поглощаемым лазерным излучением и нагрев венозной стенки при конденсации пузырьков пара. В то же время, авторы [20] на основании своих исследований отрицают основную роль этого процесса. Дизайн исследований [21], направленных на моделирование ЭВЛК, осуществляют на свиной печени, не соответствует условиям выполнения этой процедуры при лечении и не обеспечивает получения достоверных результатов.

Использование водопоглощаемого излучения позволило осуществить моделирование происходящих при ЭВЛК процессов в

реальном времени с использованием более информативных оптических методов регистрации [22, 23]. Для этого использовалась замороженная плазма донорской крови после ее размораживания. Такой выбор позволяет смоделировать нагрев крови, а наличие белков свертывающей системы крови, таких, как фибриноген и антигемофильный глобулин, позволяет смоделировать и процессы коагуляции крови, происходящие при ЭВЛК. В ходе экспериментов исследовался теплоперенос при фиксированном положении световодов [22], а для 1.94 мкм и при их вытягивании, подобном осуществляемому в процессе ЭВЛК [23].

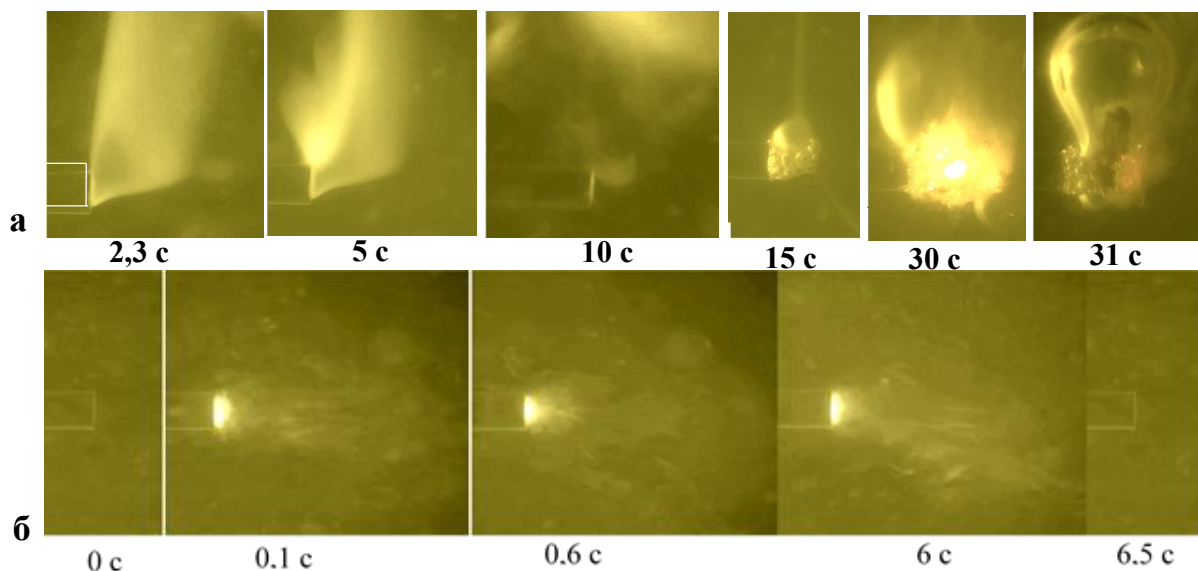


Рис. 5. Динамика теплопереноса и коагуляции плазмы крови при нагреве излучением с мощностью 5 Вт и длинами волн $\lambda = 1.55$ (а) и 1.94 (б) мкм. Цифры показывают время с момента включения излучения.

На рис. 5 представлены фотографии, показывающие процессы происходящие в плазме крови при воздействии на нее через световод диаметром 600 мкм с торцевым выводом излучения мощностью 5 Вт с длинами волн $\lambda = 1.55$ и 1.94 мкм. При этом толщина слоя плазмы, в котором поглощается излучение, составляла 1 мм для 1.55 мкм, и 0.2 мм для 1.94 мкм.

Из фотографий видно, что при использовании излучения 1.55 мкм первоначально теплоперенос осуществляется за счет конвективного потока нагретой суспензии коагулированных частиц плазмы. При этом часть коагулированной плазмы оседает около торца световода, что ведет к акту взрывного кипения на 10 с с разлетом парогазовых пузырьков и нагретой суспензии во все стороны. В дальнейшем налипший на торец коагулят ведет к карбонизации у торца световода и началу горения органики с образованием CO_2 (15 с), о чем говорит образование больших пузырей, сохраняющихся после выключения излучения (кадр 31 с). На торце световода в этом случае остается карбонизат.

При использовании излучения с длиной волны 1.94 мкм (рис. 4 (б)), сразу после включения излучения у торца световода начинается интенсивное кипение с образованием парогазовых пузырьков и суспензии коагулированных частиц плазмы, поток которой переносит тепло

преимущественно вверх. При этом происходит очищение торца световода, который остается чистым после выключения излучения (кадр 6.5 с).

Иная картина наблюдается при использовании световодов с радиальным выводом излучения. На рис. 6 для радиального световода представлены фото для момента через 0.4 с после включения излучения, соответствующего стадии конвективного теплопереноса с мощностью излучения 5 Вт для 1.94 мкм (а) и 10 Вт для 1.55 мкм. В нижней части рисунка помещены фотографии выполненные перпендикулярно оси световода (в профиль), сверху фотографии анфас.

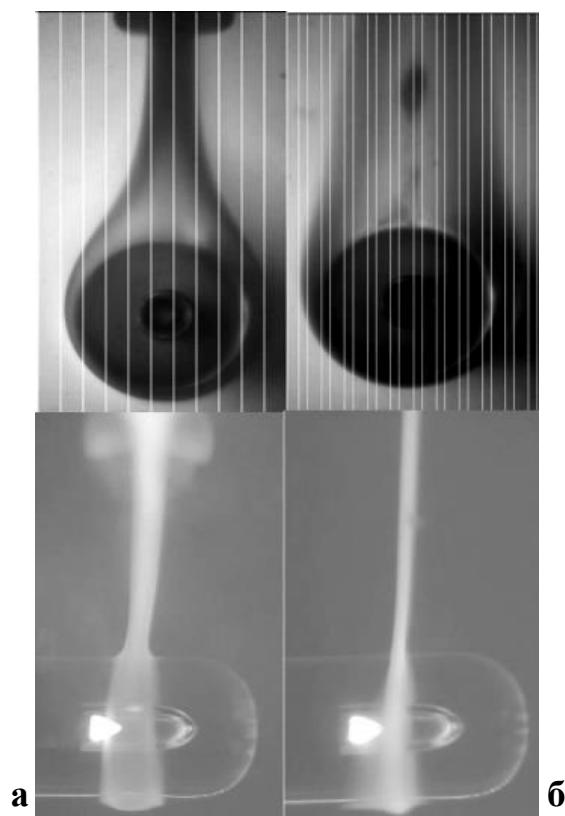


Рис. 6. Динамика теплопереноса при использовании радиальных световодов.

При увеличении мощности излучения при 1.94 мкм начинается режим кипения с очищением световода, а при 1.55 мкм формируется сгусток коагулята, в котором периодически инициируется взрывное кипение. Во всех этих случаях теплоперенос осуществляется асимметрично вверх. В случае еще более высоких мощностей излучения при 1.94 мкм вокруг радиального световода, помещенного в трубку, моделирующую вену, начиная сверху образуется скопление парогазовых пузырей, содержимое которых не поглощает излучение, которое доходит до стенки трубки и, проходя через нее, вызывает коагуляцию плазмы у внешней стороны стенки. В вене это излучение будет поглощаться

содержащейся в стенке вены водой, вызывая прямое действие излучения на стенку.

Исходя из изложенного, можно утверждать, при реализации ЭВЛК нагрев стенки вены может происходить за счет конвекции, пузырькового и взрывного кипения, а также прямого воздействия излучения. Реализация этих процессов, а также соотношение между ними зависит от длины волны излучения, скорости вытягивания световода и способа вывода излучения. Интенсивность лазерно индуцированного кипения и обеспечиваемого им теплопереноса повышается при уменьшении толщины слоя, в котором выделяется тепло. Эти можно объяснить высокую эффективность использования для ЭВЛК излучения с длиной волны 0.445 мкм [16, 17], сильно поглощаемого кровью, а также использования световодов с поглощающим слоем на торце [19], обеспечивающем поверхностное кипение.

Уменьшение болевых ощущений при ЭВЛК излучением водопоглощаемого диапазона объясняется меньшим его проникновением в прилегающие к вене ткани из-за его поглощения водой в стенке вены и тумесцентном анестетике.

1. D. Puglisi, A. Nacconi, F. San Filippo, J. Libby Eurotext **839** (1989).
2. C. Bone, Rev. Patol. Vasc. **5**, 35 (1999).
3. M. Friebel et al., Journal of Biomedical Optics **14(3)**, 034001 (2009).
4. В.П. Минаев, *Лазерные медицинские системы и медицинские технологии на их основе: Учебное пособие*, Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2020.
5. В.П. Минаев, К.М. Жилин, А.Л. Соколов, Квант. электрон. **39**, 781 (2009).
6. T.M. Proebstle et al., Dermatol. Surg. **31**, 1683 (2005).
7. T.M. Proebstle et al., Journal of Vascular Surgery **35**, 29 (2002).
8. T.M. Proebstle et al., Dermatol. Surg. **28(7)**, 596 (2002).
9. M.P. Goldman, PHLEBO №42, S10, (2003).
10. O. Göckeritz, Controversies and Update in Venous Diseases 389 (2007).
11. U. Maurins, Controversies and Update in Venous Diseases 390 (2007).
12. А.Л. Соколов и др. Флебологическая конференция Ассоциации флебологов России. 45 (2008).
13. P.J. Vandekerckhove, M. Vuylsteke, 9th International Congress of Phlebology, Bologna (Italy) (2008).
14. M.F. Somunyan et al., Proc. of SPIE **7897**, 789707 (2011).
15. D. Mendes-Pinto et al., Journal of the International Union of Angiology (2015).
16. Ю.В. Мелеховец, В.В. Леонов, Е.Е. Марченко, Материалы научно-практической конференции «Внедрение современных инновационных технологий при малоинвазивных лазерных вмешательствах: клинические, экономические и технические аспекты», Вертикаль: Черкассы, **1**, 102 (2014).
17. В.И. Пантьо, Лазерная хирургия. Материалы научно-практической конференции «Внедрение современных инновационных технологий при малоинвазивных лазерных вмешательствах: клинические, экономические и технические аспекты» Вертикаль: Черкассы, **1**, 109 (2014).
18. S. Doganci, U. Demirkilic, Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. **40**, 254 (2010).
19. В.М. Чудновский и др. Современные технологии в медицине. **8**, 6 (2016).
20. Ю.А. Шевченко, Ю.М. Стойко, К.В. Мазайшвили, *Лазерная хирургия варикозной болезни*, М.: «Боргес», 2010.
21. M.S. Whiteley, A.C. Cross, V.C. Whiteley, Lasers in Medical Science (2021).
22. V.P. Minaev et al., Lasers in Medical Science (2020).
23. К.А. Капериз и др., VII Троицкая конференция с международным участием «Медицинская физика» (ТКМФ-7), М.: Издательство ФГАОУ ВО Сеченовский Университет, 137 (2020).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВЛК ВАРИКОЗНЫХ ВЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ

С.А. Артемов, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, С.В. Костин, А.А. Ляпин,
П.А. Рябочкина, А.Д. Таратынова, С.А. Хрущалина

*Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*

E-mail: alina.taratynova@mail.ru

В настоящее время 70% всех методов лечения варикозного расширения вен приходится на процедуру эндовазальной лазерной коагуляции (ЭВЛК). При ее проведении применяются лазеры, генерирующие излучение в области 970 нм, что соответствует длине поглощения гемоглобина, и 1470 нм – длина волны поглощения воды. Однако наряду с данными длинами волн в клинической практике при проведении процедуры ЭВЛК используется двухмикронное лазерное излучение. Излучение данного диапазона более эффективно поглощается водой, что дает возможность осуществлять коагуляцию с использованием меньшего значения плотности энергии лазерного излучения и способствует решению одной из задач флебологии по минимизации послеоперационных осложнений при проведении ЭВЛК [1].

Однако вопрос об оптимальном значении линейной плотности энергии при проведении процедуры ЭВЛК с использованием двухмикронного лазерного излучения не является решенным. А учитывая, что вены имеют различные морфологические характеристики, необходимо изучение зависимости применяемой мощности лазерного излучения от диаметра сосуда.

Компьютерное моделирование – один из способов поиска оптимального значения мощности лазерного излучения для проведения ЭВЛК варикозных вен различного диаметра. Учитывая распространение излучения и тепла в рассеивающе-поглощающей среде, возможно выявить распределение температуры внутри венозного сосуда и прилегающих к нему паравенозных тканей [2]. Это позволит описать зависимость мощности лазерного излучения от диаметра сосуда, которая станет основой оптимального алгоритма проведения процедуры ЭВЛК.

Моделирование процесса ЭВЛК осуществлялось в программном пакете COMSOL Multiphysics 5.5 с использованием модуля «Теплопередача» и проводилось для следующих значений мощности излучения: 3, 4 и 6 Вт. Полученные в процессе моделирования результаты коррелируют с данными экспериментов in-vivo по ЭВЛК, выполненных с использованием лазерного излучения с длиной волны 1910 нм и аналогичными значениями мощности.

1. S.A. Artemov et al., Lasers Med Sci. **35**, 867 (2020).
2. P.W.M. Van Ruijven et al., Lasers Med. Sci. **29**, 431 (2014).

УСИЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ, ЛЕГИРОВАННЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

В.П. Агеев, А.Н. Беляев, О.С. Бушукина, С.В. Костин, О.А. Куликов,
П.А. Рябочкина, С.А. Хрущалина, В.И. Шляпкина, И.А. Юрлов
*Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, Саранск*
E-mail: anabel-2005@yandex.ru

В диэлектрических наночастицах, легированных редкоземельными (РЗ) ионами, при их возбуждении интенсивным лазерным излучением может возникать широкополосное «белое» излучение [1-4]. Мнения исследователей о природе и механизмах этого явления различны. Нами были проведены собственные исследования наноразмерных оксидных и фторидных соединений, высоколегированных РЗ-ионами (Yb^{3+} , Er^{3+}), которые подтверждают тепловую природу наблюдаемого излучения [1, 2]. Также нами был предложен механизм, ответственный за нагрев частиц до высоких температур при их возбуждении в полосы поглощения РЗ ионов [2]. Мы предположили, что описанный эффект может найти практическое применение, например, в дерматологии для удаления новообразований [2]. Было продемонстрировано, что предварительное покрытие биологической ткани наночастицами, способными к интенсивному нагреву под действием лазерного излучения, может быть использовано для повышения теплового эффекта при бесконтактном воздействии лазерного излучения [5].

Целью настоящей работы являлось сравнение теплового эффекта при использовании различных длин волн РЗ ионов и лазерного излучения в экспериментах *in-vivo*. Нами проведена сравнительная оценка степени повреждения и контроль послеоперационной динамики заживления биологических тканей после бесконтактного воздействия лазерным излучением с предварительным покрытием и без него наночастицами. Даны рекомендации о возможности практического использования наночастиц, легированных РЗ ионами, в биомедицине.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-5500.2021.1.2).

1. P.A. Ryabochkina et al., JETP Lett. **103**, 743 (2016).
2. P.A. Ryabochkina et al., RSC Adv. **10**, 26288 (2020).
3. W. Strek et al., Opt. Expr. **19**, 14083 (2011).
4. S.M. Redmond et al., J. Appl. Phys. **95**, 4069 (2004).
5. P.A. Ryabochkina et al., Quantum Electron. **51**, 1038 (2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ
МЕЖДУ НАНОЧАСТИЦАМИ $\text{NaGdF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$ @ NaYF_4
И ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОМ

Д.В. Поминова^{1,2}, В.Ю. Пройдакова¹, И.Д. Романишкин¹, А.В. Рябова^{1,2}

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

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

E-mail: pominovadv@gmail.com

Наночастицы, легированные трехвалентными редкоземельными ионами, представляют новый класс функциональных люминесцентных материалов для медицинской визуализации *in vivo*, фотодинамической терапии и адресной доставки лекарств. В последние годы наблюдается значительный интерес, как к разработке, так и к исследованию возможностей практического применения этих материалов, в частности для биомедицинских приложений.

Данная работа посвящена синтезу и исследованию наночастиц $\text{NaGdF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$, покрытых инертной оболочкой NaYF_4 , к которой затем пришивались молекулы фотосенсибилизатора. Исследовалась зависимость эффективности генерации синглетного кислорода фотосенсибилизатором при инфракрасном возбуждении в полосу поглощения иттербия ($\lambda = 980$ нм) в зависимости от толщины инертной оболочки.

Продемонстрировано, что синтезированные наночастицы обладают интенсивной ап-конверсионной люминесценцией в зеленой и красной частях спектра при излучательных переходах ионов Er^{3+} : ${}^2\text{H}_{11/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (525, 545 нм) и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (660 нм). Полоса ап-конверсионной люминесценции в красной части спектра хорошо перекрывается с полосой поглощения фотосенсибилизатора фталоцианина алюминия, за счет чего возможна опосредованная генерация синглетного кислорода при инфракрасном возбуждении. Покрытие наночастиц инертной оболочкой способствует увеличению интенсивности ап-конверсионной люминесценции. Однако при увеличении толщины оболочки происходит также увеличение расстояния между редкоземельными ионами и молекулами фотосенсибилизатора, за счет чего эффективность генерации синглетного кислорода может снижаться.

В результате проведенных в работе исследований удалось установить оптимальную толщину оболочки для получения наночастиц $\text{NaGdF}_4:\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$ @ NaYF_4 , с пришитыми молекулами фотосенсибилизатора, обладающих интенсивной ап-конверсионной люминесценцией и эффективно генерирующих синглетный кислород при инфракрасном возбуждении в полосу поглощения иттербия.

Работа при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-098.2022.1.2).

LASER TECHNOLOGY IN BIOLOGY AND MEDICINE

EVOLUTION OF THE METHOD ENDOVENOUS LASER COAGULATION FOR VARICOSE VEINS TREATMENT

V.P. Minaev

«IRE-Polus» Ltd, Fryazino, Russia

E-mail: vMinaev@ntoire-polus.ru

Varicose veins treatment by endovenous laser coagulation (EVLC) has become widespread due to the high efficiency, low pain of the procedure for the patient, the possibility of performing in an outpatient clinics, the low cost of equipment, as well as sufficient ease of mastering by doctors. The essence of this technology lies in the introduction of a fiber into the pathological vein, followed by its extraction from the vein when laser radiation is supplied through the fiber. As a result of the thermal effects which occur during the absorption of radiation, the process of fibrous transformation is started, leading to the replacement of the vein with fibrous tissue and stop of blood flow through pathological vein.

The first publication on the use of this technique was based on the use for the varicose veins treatment with a wavelength 1.06 μm radiation (Nd:YAG laser) and appeared in 1989 [1]. However, the widespread use of EVLC did not begin until 10 years after publication [2]. From this point, the process of finding the most suitable working radiation wavelengths for this procedure began in order to reduce the soreness of the procedure, as well as reduce the likelihood of relapses and undesirable side effects. Currently, laser radiation with wavelengths in the range from 0.45 to 2 μm is used for EVLC.

As in most laser medical technologies, EVLC is based on the process of heating the bio tissue when it absorbs laser radiation. The main chromophores (radiation-absorbing tissue components) in EVLC are water and hemoglobin. Moreover, the absorption value of these chromophores depends differently on the wavelength of the laser radiation and varies greatly with its change. Fig. 1 shows the dependence on μ_a of RBCs in saline solution with a Hct 33.2 % dependent on wavelength with an oxygen saturation of 100 % and 0 % compared with a hemoglobin solution with a corresponding hemoglobin concentration of 96.5 g/dL and water in the range of 0.25-2.0 μm . Measurement of optical characteristics directly on blood is impossible due to the rapid aggregation of its form elements, which greatly changes its optical properties, and the use of hemoglobin solution allows you to immediately measure the absorption coefficient, since there is no scattering in it due to the small size of hemoglobin molecules.

It should be noted that in assessing the nature of the radiation action on bio tissue, an effective coefficient of attenuation μ_{eff} of radiation plays an important role along with absorption coefficients μ_a that determine the distribution of absorbed energy between chromophores.

The effective attenuation factor μ_{eff} takes into account, in addition to the absorption process, a very strong scattering of radiation in the case of blood and

determines the change in intensity during propagation in the substance in accordance with the Lambert-Buger-Beer law:

$$I=I_0 \exp(-\mu_{\text{eff}} \cdot s) \quad (1)$$

where s is the thickness of the layer of the tissue through which the radiation passes.

That is (and this is important) precisely μ_{eff} determines the thickness of the layer in which the laser radiation is absorbed.

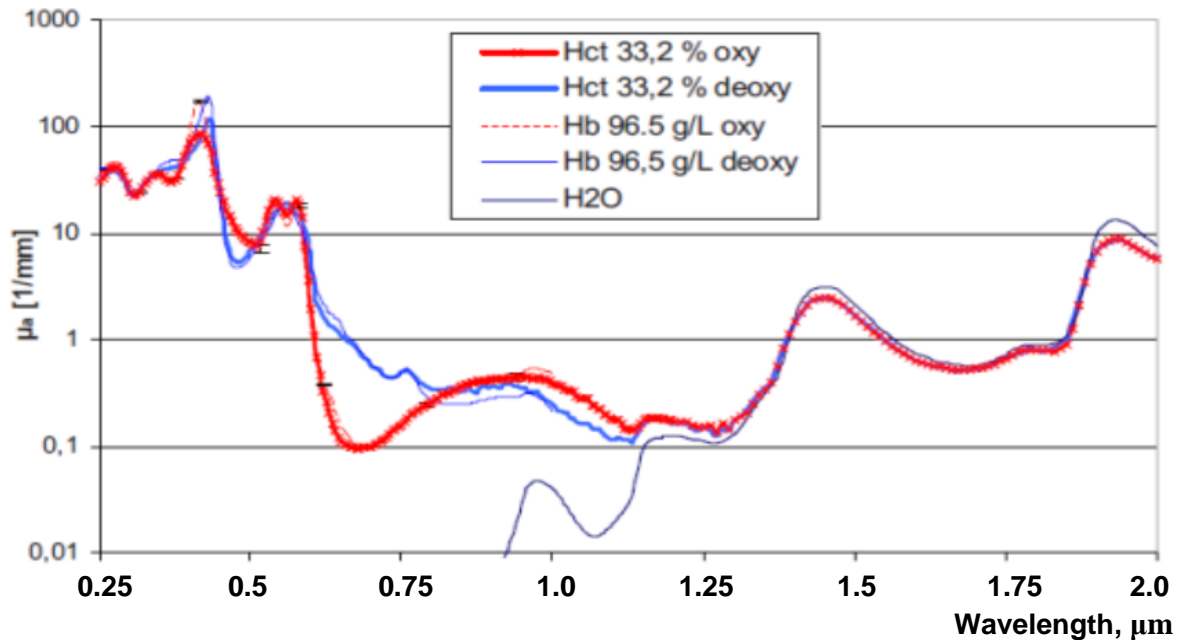


Fig. 1. μ_a of RBCs in saline solution with a Hct 33.2% dependent on wavelength with an oxygen saturation of 100% and 0% compared with a hemoglobin solution with a corresponding hemoglobin concentration of 96.5 g/dL and water.

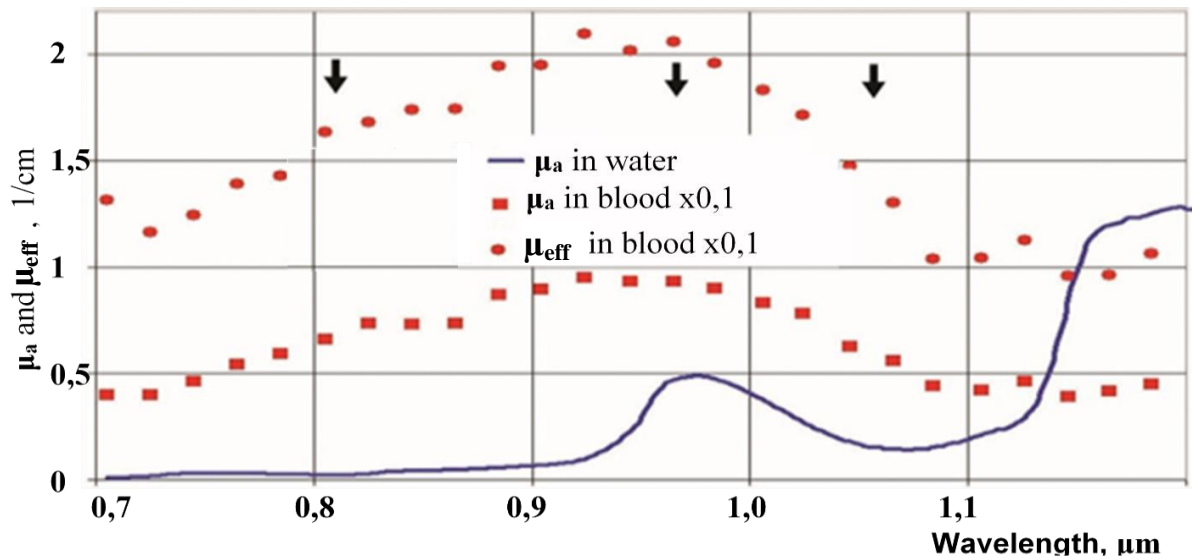


Fig. 2. μ_a and μ_{eff} of RBCs in saline solution dependent on wavelength compared with μ_a of water.

Figures 2 and 3 of [4] for the two wavelength ranges show the dependence of absorption coefficients in water and blood, as well as the effective attenuation coefficient in blood on the wavelength of radiation. Arrows show some of the radiation wavelengths used for EULC. Since the absorption in blood near 1 μm (determined mainly by the absorption in hemoglobin) exceeds the absorption in

water by more than 20 times for the considered wavelengths, such absorption is called «hemoglobin-absorbed».

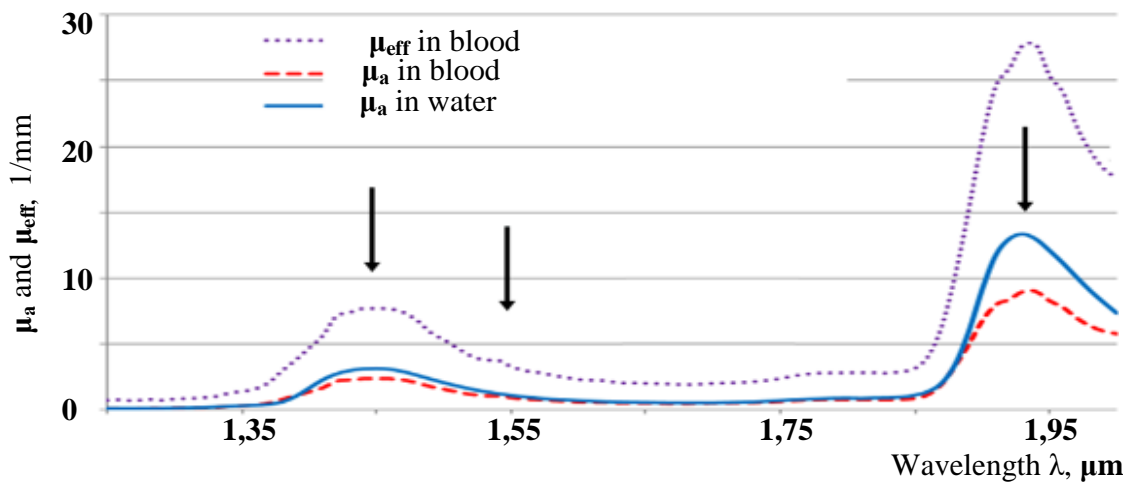


Fig. 3. μ_a and μ_{eff} of RBCs in saline solution dependent on wavelength compared with μ_a of water for $\lambda = 1.25\text{-}2.0 \mu\text{m}$.

In the wavelengths range of 1.3-2 μm , absorption in water is close to absorption in blood, and near local maxima at wavelengths of $\lambda \approx 1.44$ and 1.94 μm exceeds absorption in blood. At the same time, the effective coefficient of attenuation μ_{eff} in the blood due to scattering in it turns out to be higher than the absorption coefficient in water. Radiations with wavelengths lying in this range are called «water-absorbed».

The process of the radiation action in EVLC significantly depends on whether it is absorbed mainly by water or oxyhemoglobin. This difference was considered in work [5]. The fact is that in the event of a predominance of absorption in hemoglobin, heat is released in it, which is then transferred to water. However, if, due to the high radiation power, heat does not have time to be transferred to water, hemoglobin is heated. When the temperature reaches about 250 $^{\circ}\text{C}$ from the organic matter, burns out hydrogen - charring (carbonization) occurs. So, absorption increases sharply, the area in which radiation is absorbed and heat is released is reduced, and, therefore, the heating process is accelerated. As a result, local heating of the region near the radiation output can occur up to the beginning of the exothermic combustion process.

According to R.A. Weiss and H. Valley in the commentary to [6], the temperature can raise up to 1200 $^{\circ}\text{C}$. That is, processes similar to those implemented in the widely used technology for dissecting bio tissue by the end of a fiber of a laser scalpel occur. In this case, if the heated area touches the vein wall, then wall perforation may occur with the formation of ecchymoses and hematomas.

This is not limited to the disadvantages of using hemoglobin-absorbed radiation for EVLC. This radiation is poorly absorbed by water in the low-hemoglobin vein walls and in the «jacket» of the anesthetic solution formed during tumescent anesthesia, therefore, passing into the tissues adjacent to the vein, it can cause their burns and pain.

When the radiation of the water-absorbed range is used, the process proceeds differently. When tissue heated till a temperature of 100 $^{\circ}\text{C}$,

evaporation of water begins, associated with the energy consumption to overcome the latent heat of vaporization, which is a significant amount. Due to this, the local temperature is kept for a long time at the level of 100 °C, which is significantly less than the carbonization temperature.

In turn, the radiation that reaches the vein wall will be absorbed by the water contained in it, providing its additional thermal damage. That is, the efficiency of using laser radiation will increase. In addition, due to the absorption of water in the vein wall and «jacket» of anesthetic, the amount of radiation power reaching the tissues adjacent to the vein decreases, this leads to a decrease in pain and the likelihood of burns.

Let's return to the history of the EVLC method development.

A significant role in the spread of the method was played by the transition from bulky devices on solid-state lasers with lamp pumping to portable, reliable and inexpensive devices based on semiconductor (diode) lasers. [2] used radiation with a wavelength of $\lambda \approx 0.81 \mu\text{m}$. Subsequently, diode lasers with a wavelength of $\lambda \approx 0.94 - 0.98 \mu\text{m}$ [7, 8] began to be used. At the same time, [8] the decisive role of vein wall thermal damage to the venous in triggering fibrous transformation was noted. The results obtained using these wavelengths differed little from those obtained with 1.06 μm lasers.

In 2003 it was proposed to use to perform EVLC radiation with a wavelength of 1.32 μm [9], which is more strongly absorbed by water that is, belonging to the water-absorbed range. It was noted that the use of such radiation reduces the radiation power required to achieve the result, while also reducing the level of pain and the likelihood of the vein wall perforations, leading to undesirable consequences in the form of ecchymoses and hematomas. The disadvantage was that a bulky laser on Nd:YAG was used as a source of such radiation.

The results of using for EVLC radiation with wavelengths 1.47, 1.50 and 1.55 μm , also related to the water-absorbed range, but obtained from more convenient devices based on diode and fiber lasers, were presented in 2007-2008 [10-13]. At the same time, for example, the use of radiation with a wavelength of 1.56 μm made it possible, compared with 0.97 μm , to approximately halve the radiation power used for EVLC [5].

Reported in 2011 results of using laser radiation with a wavelength of 1.94 μm [14] for EVLA showed that this radiation, which is even more strongly absorbed by water, makes it possible to carry out the procedure with powers approximately half that of 1.47 μm [15] and a lower level of pain.

Thus, it seemed that the advantage of water-absorbed radiation over hemoglobin-absorbed radiation was reliably justified.

But here appeared practically not noticed by the phlebological community several works of Ukrainian colleagues, for example [16-17], which showed an advantage over lasers with a wavelength of 0.94 and 1.47 μm , not just hemoglobin-absorbed, but an ultra-hemoglobin-absorbed (see Fig. 1) radiation of diode lasers with a wavelength of 0.445 μm . Thus, the values of radiation powers used for the successful implementation of EVLV in [16] were 15-18 W at 0.94 μm , 7-9 W at 1.47 W and 1-2 W (!) at 0.445 μm . At the same time, it

was noted that the number of adverse events was similar when using radiation with wavelengths of 1.47 and 0.445 μm and noticeably lower compared to 0.94 μm . In [17], these values were 18-25 W (0.94 μm), 10-15 W (1.47 μm) and 5-7 W (0.445 μm), respectively. This paper indicates that the number of adverse events compared to the use of 0.94 μm radiation is reduced by the use of 1.47 μm radiation and becomes minimal by the use of 0.445 μm radiation.

In addition, work [19] appeared, showing that a noticeable decrease in the radiation power implementing the desired result of EVLC can be achieved by using radiation of 0.97 microns with a fiber, the end of which was previously inked due to a short-term touch with a tree. However, with this approach, the wavelength of radiation does not play a significant role.

This somewhat destroyed the harmonious scheme of physical justification of the advantage of water-absorbed radiation.

The improvement of EVLC technology was not limited only to the selection of the wavelength of the working radiation. Since the main object of the effect that ensured the initiation of fibrous transformation is the vein wall, it was proposed to use fibers with radial radiation output [18]. At the same time, it was assumed that such fibers would provide uniform thermal damage to the entire vein wall.

Subsequently, it was proposed to use two-ring light guides with two circular radiation terminals (Fig. 4).

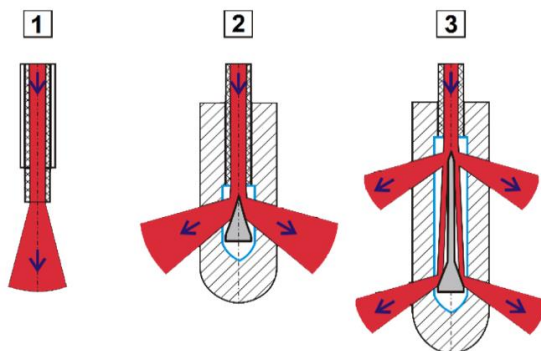


Fig. 4. Fibers with radiation output from the bare tip (1), radial (2) and «two-ring» (3) fibers.

with a probability exceeding 90 % is realized when using all the above-mentioned radiation, end and radial radiation output. The difference is observed in the level of pain accompanying treatment, and therefore the need for analgesics, the likelihood of adverse side effects (ecchymoses, hematomas and paresthesias), and the duration of postoperative recovery. And this difference makes it appropriate to continue research aimed at optimizing the procedure.

A prerequisite for a successful solution to this problem is an understanding of the biophysical processes occurring in EVLC. Therefore, the development of the technique is accompanied to date by studies based on physical and mathematical modeling of these processes, the main of which is the process of heat transfer to the venous wall. Moreover, it is physical modeling that plays the main role, since only it can give the correct data necessary for conducting mathematical modeling, since the incorrect physical model laid

The disadvantage of such fibers was the higher cost compared to fibers with bare tip.

Thus, to date, laser radiation with different wavelengths has been used to treat varicose veins with EVLC. And it is important to note that with the correct selection of energy parameters (radiation power and fiber draw velocity), an effective solution of the problem

down in the basis of mathematical modeling can give beautiful results that have nothing to do with real processes.

These studies are hindered by blood opacity, as a result of which these studies can be carried out using ultrasound machines and based on the final results of laser exposure. The results obtained at the same time allow for different interpretations, as a result of which researchers come to different conclusions. Thus, the authors of [6, 7] come to the conclusion that the main thing in the process of heat transfer at EVLC is boiling caused by absorbed laser radiation and heating of the vein wall during condensation of steam bubbles. At the same time, the authors [20], based on their studies, deny the main role of this process. The design of studies [21] aimed at modeling EVLC is carried out on pig liver, does not comply with the conditions for performing this procedure during treatment and does not provide reliable results.

The use of water-absorbed radiation made it possible to simulate the processes taking place during EVLC in real time using more informative optical recording methods [22, 23]. For this, frozen plasma of donor blood was used after thawing it. This choice allows you to simulate blood heating, and the presence of coagulation proteins such as fibrinogen and antihemophilic globulin allows you to simulate the processes of blood coagulation occurring during EVLC. In the course of experiments, heat transfer was studied at a fixed position of fibers [22], and for 1.94 μm during their stretching, similar to that carried out in the process of EVLC [23].

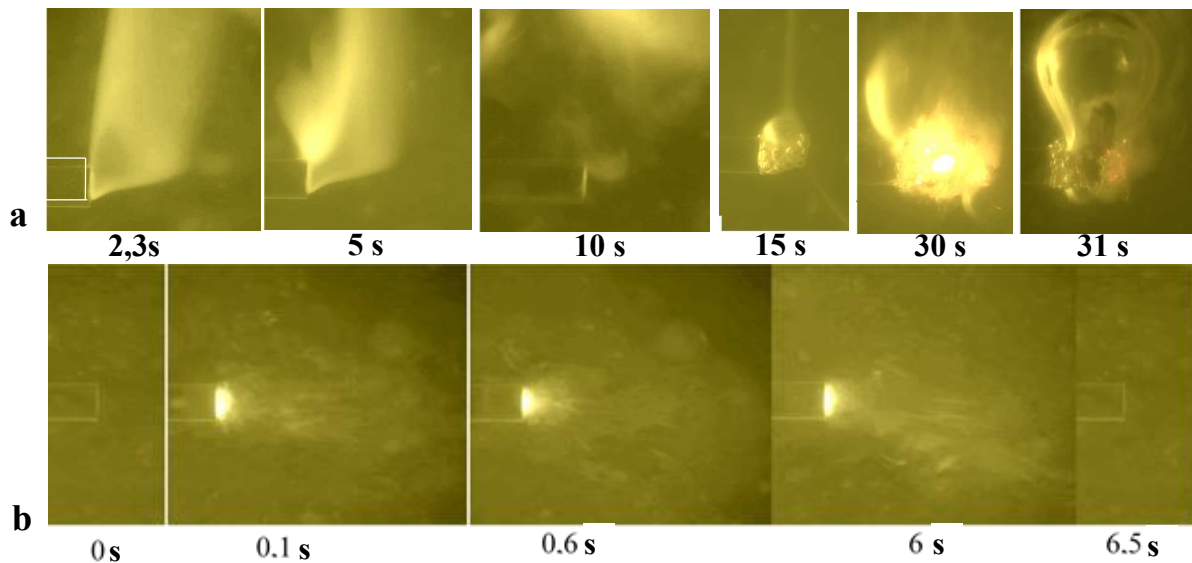


Fig. 5. Dynamics of heat transfer and coagulation of blood plasma when heated with radiation 5W and wavelengths $\lambda = 1.55$ (a) and 1.94 (b) μm , 5 W. The numbers show the time from the moment when radiation was switched on.

Fig. 5 shows photographs showing the processes taking place in the blood plasma when exposed to it through a fiber with a diameter of 600 μm with a bare tip output of radiation with a power of 5 W at wavelengths of $\lambda = 1.55$ and 1.94 μm . The thickness of the plasma layer in which the radiation is absorbed was near 1 mm for 1.55 μm and near 0.2 mm for 1.94 μm .

It may be seen from the photographs that when 1.55 μm radiations is used, initially the heat transfer is carried out due to the convective flow of the heated suspension of coagulated plasma particles. At the same time, part of coagulated plasma settles near the end of the fiber, which leads to the act of explosive boiling for 10 s with the spread of vapor-gas bubbles and heated suspension in all directions. Subsequently, the coagulate adhered to the end leads to carbonization at the end of the fiber and the beginning of burning of the organic matter with the formation of CO_2 (15 s), as indicated by the formation of large bubbles that persist after the radiation is turned off (frame 31 s). In this case, carbonizate remains at the end of the fiber.

If radiation with a wavelength of 1.94 μm (Fig. 4 (b)) was used, immediately after the radiation is turned on, intense boiling begins at the end of the fiber with the formation of vapor-gas bubbles and a suspension of coagulated plasma particles, the flow of which carries heat mainly upward. In this case, the end face of the fiber is cleaned, and remains clean after the radiation is turned off (frame 6.5 s).

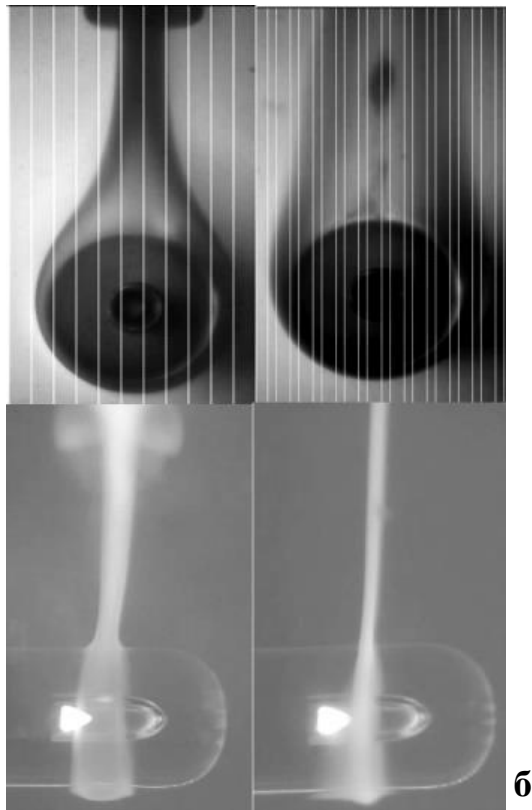


Fig. 6. Dynamics of heat transfer if fibers with radial radiation output was used.

Another picture is observed when using fibers with radial radiation output. Figure 6 for the radial light guide shows a photo for the moment in 0.4 s after the radiation is turned on, corresponding to the convective heat transfer stage with a radiation power of 5 W for 1.94 μm (a) and 10 W for 1.55 μm . In the lower part of the figure there are photos taken perpendicular to the axis of the light guide (in profile), on top of the photo full face.

With an increase in radiation power at 1.94 μm , a boiling mode begins with the purification of the fiber, and at 1.55 μm a coagulate clot is formed, in which explosive boiling is periodically initiated. In all these cases, heat transfer is carried out asymmetrically upward. In the case of even higher radiation powers at 1.94 μm around the radial fiber placed in the vein-modeling tube, a cluster of vapor-gas bubbles is formed from above, the contents of which do not absorb radiation that reaches the wall of the tube (Moses effect) and, passing through it, causes coagulation of plasma at the outside of the wall. In the vein, this radiation will be absorbed by the water contained in the vein wall, causing direct radiation action on the wall.

Based on the above, it can be argued that in the implementation of EVLC, heating of the vein wall can occur due to convection, bubble and explosive boiling, as well as direct exposure to radiation. The implementation of these processes, as well as the relationship between them, depends on the wavelength of

the radiation, the speed of drawing the fiber and the method of outputting radiation. The intensity of laser induced boiling and the heat transfer it provides increases as the thickness of the layer in which the heat is generated decreases. These can be explained by the high efficiency of using for EVLC radiation with a wavelength of 0.445 μm [16, 17], strongly absorbed by blood, as well as the use of fibers with an absorbing layer at the end [19], which provides surface boiling.

The decrease in pain in EVLC by the radiation of the water-absorbed range is explained by its less penetration into the tissues adjacent to the vein due to its absorption by water in the vein wall and tumescent anesthetic.

1. D. Puglisi, A. Nacconi, F. San Filippo, J. Libby Eurotext **839** (1989).
2. C. Bone, Rev. Patol. Vasc. **5**, 35 (1999).
3. M. Friebel et al., Journal of Biomedical Optics **14(3)**, 034001 (2009).
4. V.P. Minaev, *Laser Medical Systems and Medical Technologies Based on Them: A Study Guide*, Dolgoprudny: ID «Intellect», 2020 (in Russian).
5. K.M. Zhilin, V.P. Minaev, A.L. Sokolov, Quantum Electron. **39**, 781 (2009).
6. T.M. Proebstle et al., Dermatol. Surg. **31**, 1683 (2005).
7. T.M. Proebstle et al., Journal of Vascular Surgery **35**, 29 (2002).
8. T.M. Proebstle et al., Dermatol. Surg. **28(7)**, 596 (2002).
9. M.P. Goldman, PHLEBO №42, S10, (2003).
10. O. Göckeritz, Controversies and Update in Venous Diseases 389 (2007).
11. U. Maurins, Controversies and Update in Venous Diseases 390 (2007).
12. A.L. Sokolov et al., Phlebology. Special issue, VII Conf of the Russian Phlebological Association. Moscow, 45 (2008).
13. P.J. Vandekerckhove, M. Vuylsteke, 9th International Congress of Phlebology, Bologna (Italy) (2008).
14. M.F. Somunyudan et al., Proc. of SPIE **7897**, 789707 (2011).
15. D. Mendes-Pinto et al., Journal of the International Union of Angiology (2015).
16. Yu.V. Melehovec, V.V. Leonov, E.E. Marchenko, Proceedings of the Conf. «Laser surgery. Introduction of modern innovative technologies in minimally invasive laser interventions: clinical, economic and technical aspects», Vertical: Cherkassy, **1**, 102 (2014) (in Ukr.).
17. V.I. Pant'o, Proceedings of the Conf. «Laser surgery. Introduction of modern innovative technologies in minimally invasive laser interventions: clinical, economic and technical aspects», Vertical: Cherkassy, **1**, 109 (2014) (in Ukr.).
18. S. Doganci, U. Demirkilic, Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg. **40**, 254 (2010).
19. V.M. Chudnovskii et al., Modern technologies in medicine, **8(2)**, 6 (2016) (in Russ.).
20. Yu.A. Shevchenko, Yu.M. Stoyko, K.V. Mazayshvily, *Laser Surgery of Varicose Disease*, Moscow: «Borges», 2010.
21. M.S. Whiteley, A.C. Cross, V.C. Whiteley, Lasers in Medical Science (2021).
22. V.P. Minaev et al., Lasers in Medical Science (2020).
23. K.A. Kaperiz et al., Proceedings of the VII Troitsk Conf. On Medical Physics (TCMP-7), Moscow, 137 (2020).

AMPLIFICATION OF THE THERMAL EFFECT OF LASER RADIATION
OF VARIOUS WAVELENGTHS ON BIOLOGICAL TISSUES USING
DIELECTRIC NANOPARTICLES DOPED WITH RARE-EARTH IONS

V.P. Ageev, A.N. Belyaev, O.S. Bushukina, S.A. Khrushchalina, O.A. Kulikov,
P.A. Ryabochkina, V.I. Shlyapkina, I.A. Yurlov

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

E-mail: anabel-2005@yandex.ru

Dielectric nanoparticles doped with rare-earth (RE) ions, when they are excited by intense laser radiation, can show broadband «white» emission [1-4]. The researcher's opinions about the nature and mechanisms of this phenomenon are different. Our own studies of nanosized oxide and fluoride particles highly doped with RE ions (Yb^{3+} , Er^{3+}) confirmed that the observed emission is thermal [1-4]. We also proposed a mechanism responsible for intensive heating particles when they are excited into the absorption bands of RE ions [2]. In our opinion, described effect can find practical application, for instance, in dermatology for the removal of neoplasms [2]. We have shown that the preliminary coating of biological tissue with nanoparticles capable of intense heating under the action of laser radiation can be used to increase the thermal effect during non-contact exposure to laser radiation [5].

In this work we compare the thermal effect when using different RE ions and laser radiation wavelengths in *in-vivo* experiments. We compared the damage degree of biological tissues and controlled of the postoperative dynamics of its healing after non-contact exposure to laser radiation with and without pre-coating with nanoparticles. Recommendations are given on the possibility of practical use of nanoparticles doped with RE ions in biomedicine.

This work is financially supported by a grant from the President of the Russian Federation (MK-5500.2021.1.2).

1. P.A. Ryabochkina et al., JETP Lett. **103**, 743 (2016).
2. P.A. Ryabochkina et al., RSC Adv. **10**, 26288 (2020).
3. W. Strek et al., Opt. Expr. **19**, 14083 (2011).
4. S.M. Redmond et al., J. Appl. Phys. **95**, 4069 (2004).
5. P.A. Ryabochkina et al., Quantum Electron. **51**, 1038 (2021).

STUDY OF THE SHELL THICKNESS INFLUENCE ON THE EFFICIENCY
OF THE ENERGY TRANSFER BETWEEN NaGdF₄:Yb³⁺-Er³⁺@NaYF₄
NANOPARTICLES AND PHOTOSENSITIZER

D.V. Pominova^{1,2}, V.Yu. Proydakova¹, I.D. Romanishkin¹, A.V. Ryabova^{1,2}

¹*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

E-mail: pominovadv@gmail.com

Nanoparticles doped with trivalent rare earth ions represent a new class of functional luminescent materials for *in vivo* medical imaging, photodynamic therapy, and targeted drug delivery. In recent years, there has been considerable interest both in the development and in the study of the practical application of these materials, in particular for biomedical applications.

This work is devoted to the synthesis and study of NaGdF₄:Yb³⁺-Er³⁺ nanoparticles coated with an inert NaYF₄ shell, to which were attached photosensitizer molecules. The dependence of the singlet oxygen generation efficiency by a photosensitizer under infrared excitation into the ytterbium absorption band ($\lambda = 980$ nm) as a function of the thickness of the inert shell was studied.

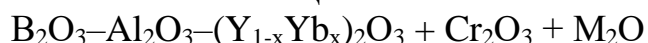
It has been demonstrated that the synthesized nanoparticles exhibit intense upconversion luminescence in the green and red parts of the spectrum during radiative transitions of Er³⁺ ions $^2H_{11/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (525, 545 nm) and $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (660 nm). The upconversion luminescence band in the red part of the spectrum overlaps well with the aluminum phthalocyanine photosensitizer absorption band, due to which the indirect generation of singlet oxygen upon infrared excitation is possible. The coating of nanoparticles with an inert shell promotes an increase in the intensity of the upconversion luminescence. However, as the shell thickness increases, the distance between rare earth ions and photosensitizer molecules also increases, due to which the efficiency of singlet oxygen generation can decrease.

As a result of the studies carried out in this work, it was possible to establish the optimal shell thickness for obtaining NaGdF₄:Yb³⁺-Er³⁺@NaYF₄ nanoparticles with attached photosensitizer molecules, which have intense upconversion luminescence and efficiently generate singlet oxygen upon infrared excitation into the absorption band of ytterbium.

The work was funded by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - candidates of sciences (MK-3098.2022.1.2).

НОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ



Н.В. Голубев¹, М.З. Зиятдинова¹, Е.С. Игнатьева¹, В.В. Ковгар²,
Г.Е. Малашкевич², П.П. Першукевич², В.Н. Сигаев¹, И.В. Станишевский³
¹*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*
²*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*
³*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск*
E-mail: g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by

Ионы Cr^{3+} благодаря широким полосам поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра и люминесценции в красной и ближней инфракрасной представляют несомненный интерес для использования в люминесцентных концентраторах солнечного излучения. Однако из-за относительно невысокого квантового выхода люминесценции (η), который при комнатной температуре не превышает 25 % [1], Cr-содержащие стёкла для практического использования обычно соактивируют эффективно люминесцирующими редкоземельными ионами, в частности, ионами Yb^{3+} [2]. Ранее было показано, что среди оксидных матриц иттрий-алюмооборатные стёкла с составом вблизи стехиометрии хантита ($\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$) характеризуются рекордно большой величиной минимального расстояния между ионами редкоземельных активаторов (≈ 0.67 нм) [3]. Это способствует снижению в них эффективности концентрационного тушения люминесценции. В результате, η ионов Yb^{3+} в таких стёклах, не подвергнутых принудительной дегидратации, составляет ≈ 80 % при концентрации Yb_2O_3 равной 0.5 моль % и снижается не более чем на 20 % при увеличении последней до 2 моль % [4]. В вышедшей недавно публикации [5] было показано, что в подобных стёклах, дополнительно легированных кремнием, хром реализуется преимущественно в степени окисления Cr(III) с заметной примесью Cr(IV) и Cr(V), которая играет роль внутреннего фильтра и тушителя люминесценции Cr(III), а квантовый выход сенсibilизированной люминесценции Yb^{3+} не превышает 32 %. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка найти пути повышения значения η таких стекол и выяснить их пригодность в качестве люминесцентного конвертора солнечного излучения в ближнюю ИК-область спектра.

Исследуемые стекла синтезировались путём плавления шихты в лабораторной печи сопротивления с SiC нагревателями в платиновом тигле при $T \approx 1480$ °C на воздухе в течение 60 мин. В качестве исходных компонентов использовали Yb_2O_3 (осч), Y_2O_3 (осч), Cr_2O_3 (хч), $\text{Al}(\text{OH})_3$ (чда), Na_2CO_3 , K_2CO_3 , CsNO_3 (все хч), H_3BO_3 (хч). Для минимизации содержания OH^- -групп, тушащих люминесценцию как Cr^{3+} , так и Yb^{3+} , расплав барботировался сухим кислородом.

Спектры поглощения, люминесценции и возбуждения люминесценции регистрировали на спектрофотометре Cary-500 и спектрофлуориметре Fluorolog-3 соответственно. Кинетику

люминесценции исследовали с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS3032B при возбуждении излучением перестраиваемых моноимпульсных лазеров. Разложение спектральных кривых на индивидуальные компоненты осуществлялось методом безградиентной оптимизации Нелдера-Мида. Квантовый выход люминесценции определялся абсолютным методом и путём сравнения с эталоном, а его зависимость от длины волны возбуждения – оригинальным методом.

Установлено, что ионы хрома в синтезированном на воздухе иттрий-алюмооборатном стекле формируют подавляющую долю оптических центров трёх и четырёх координированного Cr^{3+} , а также примесь центров Cr^{4+} , Cr^{5+} и Cr^{6+} . Барботирование расплава этих стекол кислородом, либо введение щелочных металлов сопровождается существенным повышением доли Cr^{6+} . При этом влияние тяжёлых щелочных металлов на степень окисления хрома значительно слабее, чем лёгких. Люминесценция ионов Cr^{3+} в синтезированных стеклах обусловлена центрами как с сильным, так и слабым лигандным полем. Первоначальное формирование центров Cr^{3+} происходит преимущественно в субмикрорегионах матрицы, обогащённых щелочными металлами, иттрием либо иттербием. Квантовый выход люминесценции ионов Cr^{3+} и сенсibilизированной ими люминесценции ионов Yb^{3+} испытывает сильную зависимость от длины волны возбуждения (см. рис. 1.), обусловленную влиянием внутреннего фильтра, роль которого выполняют ионы Cr^{4+} , Cr^{5+} и Cr^{6+} .

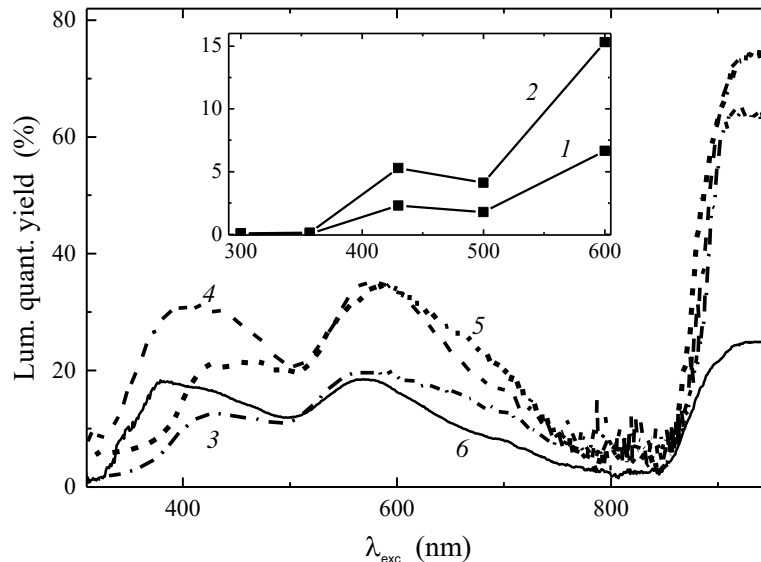


Рис. 1. Зависимость квантового выхода люминесценции Cr- (вставка) и Cr–Yb-содержащих стекол системы (моль %) $60\text{B}_2\text{O}_3-30\text{Al}_2\text{O}_3-10(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{O}_3$ + (масс %) $y\text{Cr}_2\text{O}_3 + z\text{M}_2\text{O}$ от длины волны возбуждения. x : 0(1); 0.5(2,3); 1.0(4,5); 2.0(6). y : 0.007(1); 0.014(2); 0.05(4,5); 0.02 (3). z : 5.0(3); 8.0(5). $\text{M} = \text{Na}$. Расплав стекол 2 и 4 барботировался кислородом.

Ионы Cr^{4+} , поглощающие в широкой электродипольной полосе ${}^3A_2 \rightarrow {}^3T_1$ с $\lambda_{\text{max}} \approx 620$ нм и слабой магнитодипольной ${}^3A_2 \rightarrow {}^3T_2$ полосе вблизи 1 мкм [6], в данных стёклах не люминесцируют, а ионы Cr^{5+} проявляют слабую широкополосную люминесценцию в красной области спектра,

которая предположительно обусловлена полиэдрами $[\text{CrO}_6]^{7-}$. Перенос возбуждений от ионов Cr^{3+} на ионы Yb^{3+} осуществляется в основном по диполь-дипольному механизму от центров со слабым лигандным полем как из состояния 4T_2 , так и состояния 2E . Максимальное пиковое значение квантового выхода сенсibilизированной люминесценции Cr–Yb-содержащих стёкол составляет $\approx 35\%$ и достигается для щелочных и «барботированных» стекол с небольшой концентрацией хрома и иттербия (рис. 1., см. кривые 4 и 5 при $\lambda_{\text{exc}} \approx 580$ нм). Очевидно, что устранение примеси Cr^{4+} и тетраэдрических центров Cr^{5+} , поглощающих в широких полосах при $\lambda_{\text{max}} \sim 670$ нм и 1100 нм [7], приведёт к существенному увеличению квантового выхода люминесценции и нивелированию провала в его спектре при $\lambda \approx 800$ нм. При большой концентрации Yb^{3+} (≥ 2 моль % Yb_2O_3) возможна слабоэффективная передача возбуждений последним из состояния переноса заряда оксокомплексов $[\text{CrO}_4]^{2-}$, о чём свидетельствует появление небольшого «горба» при $\lambda \approx 380$ нм (см. рис. 1., кривая 6).

Таким образом, исследованные соактивированные стёкла с учётом их малого светорассеяния при минимизации примеси высокозарядных ионов хрома могут представлять реальную альтернативу разрабатываемым люминесцентным концентраторам солнечного излучения на основе Cr–Yb-содержащей стеклокерамики. Могут оказаться они и оптимальным downshifting-конвертором солнечного излучения в «рабочую» полосу поглощения потенциальных лазерных стеклокерамик с ионами Ni^{2+} [8].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф21РМ-011), Министерства науки и высшего образования России (грант № ФССМ-2020-0003), а также с использованием оборудования Центра коллективного пользования им. Д.И. Менделеева по гранту № 13.ЦКП.21.0009 Министерства науки и высшего образования России.

1. И.Б. Арцыбышева и др., Физика и химия стекла **16**, 625 (1990).
2. W. Fu et al., Ceramics International **46**, 15054 (2020).
3. G.E. Malashkevich et al., Mat. Chem. Phys. **137**, 48 (2012).
4. G.E. Malashkevich et al., Opt. Mater. **76**, 253 (2018).
5. Г.Е. Малашкевич и др., Оптика и спектроскопия **130**, 199 (2022).
6. X. Feng, S. Tanabe, Opt. Mat. **20**, 63 (2002).
7. P. Gerner, K. Kramer, H.U. Gudel, J. Lumin. **102–103**, 112 (2003).
8. A.S. Grabtchikov et al., Opt. Commun. **491**, 126955 (2021).

НОВЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СТЁКОЛ В СИСТЕМЕ $\text{PbCl}_2\text{-PbO-SiO}_2$

Д.А. Бутенков, О.Б. Петрова, К.И. Рунина, А.М. Сластухина

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

E-mail: dabutenkov@gmail.com

Пионерские работы по оксохлоридным стёклам и последующий рост интереса исследователей к ним пришлись на 1970-1990-ые годы XX века [1]. Эти исследования, в основном, были направлены на изучение электропроводности в стёклах и создания на их основе твёрдых электролитов [2]. Однако в научной литературе отсутствуют сведения о их оптических и спектральных свойствах. Создание на основе этих систем новых люминесцентных и лазерных материалов является перспективным, благодаря низким фононным энергиям галогенидной матрицы и, следовательно, возможности получения эффективного излучения в ИК области спектра [3].

Синтезированы стекла в системе $\text{PbCl}_2\text{-PbO-SiO}_2\text{-NdF}_3$ по стандартной расплавной методике. В качестве исходных реактивов использовали PbCl_2 , PbO , SiO_2 , NdF_3 чистотой не хуже 99.99 масс. %. Удалось получить качественные стёкла с номинальным содержанием хлорида свинца до 60 мол. %. Аморфную структуру образцов подтверждали рентгенофазовым анализом (РФА). Стёкла исследовались методами оптической спектроскопии и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Стеклокристаллические материалы (СКМ) получали путем контролируемой кристаллизации стекол в различных температурно-временных условиях.

Люминесценция СКМ и исходных стёкол снята при возбуждении лазером на длине волны 785 нм. В данной оксохлоридной системе проявляется типичная для ионов Nd^{3+} люминесценция при переходах с возбуждённого состояния ${}^4\text{F}_{3/2}$ на состояния ${}^4\text{I}_{9/2}$ (880 нм), ${}^4\text{I}_{11/2}$ (1060 нм) и ${}^4\text{I}_{13/2}$ (1325 нм). Спектры люминесценции СКМ претерпевают значительные изменения по сравнению со спектрами исходных стёкол. Результаты РФА показали образование хлоридных кристаллических фаз, в том числе и PbCl_2 . Изменения в спектрах люминесценции связаны в первую очередь вхождением ионов Nd^{3+} в образовавшиеся кристаллиты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание FSSM-2020-0005.

1. P.C. Schultz, M.S. Mizzoni, J. Am. Ceram. **56(2)**, 65 (1973).
2. I.A. Sokolov et al., Glass Physics and Chemistry **26(2)**, 148 (2000).
3. Д.А. Бутенков, К.И. Рунина, О.Б. Петрова, Стекло и керамика **4**, 3 (2021).

ПОЛУЧЕНИЕ АМОРФНОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ОБОГАЩЕННОГО ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si

А.Д. Буланов, К.Ф. Игнатова, М.Е. Комшина, О.Ю. Трошин
*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,
Нижний Новгород*
E-mail: ignatova@ihps-nnov.ru

Получение и изучение свойств изотопно модифицированных материалов является перспективным направлением для различных областей науки и техники [1, 2]. В частности, указывается на возможность изготовления световодов с модифицированным изотопным составом на основе диоксида кремния, обладающих более широким окном прозрачности и меньшими оптическими потерями. Однако сведения о получении и изучении свойств реальных образцов весьма ограничены.

При работе с дефицитными и дорогостоящими изотопно обогащенными веществами необходимо оперировать малыми количествами веществ, что может обеспечить золь-гель метод, являющийся одним из перспективных способов получения монолитных образцов диоксида кремния. Для получения $^{28}\text{SiO}_2$ золь-гель методом проводили реакцию $^{28}\text{SiCl}_4$ с осушенным этиловым спиртом и гидролиз образованного $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ водно-спиртовым раствором в мольном соотношении $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:4:4$. Далее раствор выдерживали до образования ксерогеля, который затем прокаливали. Для изучения процесса гелеобразования было проведено исследование по подбору катализатора (HCl , HNO_3 , HF) и температурного режима сушки. Изучили кинетику роста размера частиц золь-гелей и определили плотности полученных образцов. В рамках данной работы были получены образцы аморфного SiO_2 из простого вещества $^{\text{nat}}\text{Si}$, ^{28}Si , ^{29}Si и ^{30}Si , растворением кремния в смеси азотной и плавиковой кислот с последующим осаждением диоксида кремния аммиаком. Осадок центрифугировали и промывали дистиллированной водой. Полученные осадки диоксида кремния различного изотопного состава высушивали и прокаливали при $800\text{ }^\circ\text{C}$.

Методом ИК спектроскопии были получены и охарактеризованы спектры образцов диоксида кремния различного изотопного состава. Для $^{\text{nat}}\text{SiO}_2$, $^{29}\text{SiO}_2$, и $^{30}\text{SiO}_2$ наблюдается смещение полос поглощения на величину $8.6\text{-}24.3\text{ см}^{-1}$ в низкочастотную область по отношению к диоксиду кремния-28. Величина сдвига значительно отличается от теоретического значения, рассчитанного из соотношения приведенных масс. Определение примесного и изотопного состава образцов проводили методом МС-ИСП. Согласно данным рентгенофазового анализа, образцы являются аморфными и не содержат кристаллические включения.

1. В.Г. Плеханов, Успехи физических наук **108(11)**, 1245 (2000).
2. D.C. Allan, J.T. Brown, Patent USA № 0022562 (03.02.2005).

КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНО ПОГЛОЩАЮЩЕГО СФЕРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА

М.В. Кудряшов, Н.В. Сомов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

E-mail: m.v.kudryashov@phys.unn.ru, somov@phys.unn.ru

Наиболее применяемые в настоящее время методы учета поглощения рентгеновского излучения исходят из того, что линейный коэффициент поглощения μ постоянен во всем объеме образца. Однако μ может отличаться в различных частях реального кристалла, за счет дефектов, неоднородного вхождения примесных и допирующих элементов и др. Зачастую неоднородное вхождение примеси наблюдается в кристаллах твердых растворов, которые находят широкое практическое применение, например, в оптике как лазерные, нелинейно-оптические материалы; в микро-, нано- и оптоэлектронике. Таким образом, рентгеноструктурный анализ (РСА) таких материалов может быть осложнен некорректным учетом неоднородного поглощения исследуемого образца.

В данной работе проанализировано влияние неоднородного поглощения на данные рентгеновской дифракции и предложен метод учета поглощения рентгеновского излучения неоднородным кристаллическим образцом. Предлагается численный метод расчета поправок на поглощение для интенсивностей рефлексов, получаемых от сферического образца с неоднородным поглощением. В основе метода лежит разбиение объема образца регулярной сеткой, направления которой совпадают с направлениями падающего и отраженного луча. Каждый узел сетки является центром нормального отражения, а величина μ в элементарном объеме с центром в узле определяется функцией координат. Фактор поглощения рассчитывается как сумма потерь при падении и отражении от каждого узла m регулярной сетки в объеме кристалла.

Проведена апробация предложенного метода на модельных кристаллических сферических образцах, характеризующихся различными законами изменения коэффициента поглощения в объеме образца. Обнаружено, что неоднородное распределение поглощающей способности существенно влияет на интенсивность рентгеновского излучения, регистрируемого детектором при РСА, и при этом коэффициент ослабления дифрагированного пучка существенно зависит от направления градиента коэффициента поглощения.

Предложен метод поиска модели поглощения в сферическом образце и метод коррекции экспериментального массива дифракционных данных с учетом неоднородного поглощения образца.

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания № 0729-2020-0058.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $ZrO_2-Sc_2O_3-Tb_2O_{3.5}$

Н.А. Ларина¹, Е.Е. Ломонова², П.А. Рябочкина¹, Н.Ю. Табачкова^{2,3}

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

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

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

E-mail: saharova.1996@mail.ru

В настоящее время перспективным направлением является разработка кислород-проводящих мембран для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) на основе кристаллов стабилизированного диоксида циркония. Твердые растворы $ZrO_2-Sc_2O_3$ обладают высокой ионной проводимостью по сравнению с другими материалами на основе диоксида циркония и поэтому представляют значительный интерес в качестве материала твердого электролита [1].

С точки зрения фазового состава и наличия фазовых переходов соединения $ZrO_2-Sc_2O_3$ являются достаточно сложными материалами. Поэтому, чтобы получить стабильные кубические твердые растворы используют дополнительные легирующие добавки оксидов иттрия или редкоземельных элементов [2-4].

Цель настоящей работы - оценить влияние термической обработки на фазовый состав, структуру и спектрально-люминесцентные свойства твердых растворов $ZrO_2 - x$ мол. % Sc_2O_3 ($x = 8, 9$ и 10), дополнительно легированных оксидом тербия с концентрацией от 1 до 2 мол. %.

В качестве образцов для исследований использовали монокристаллы твердых растворов, которые были получены методом направленной кристаллизации расплава с использованием прямого высокочастотного нагрева в «холодном» контейнере. Термическая обработка проводилась в окислительной ($T = 1000$ °С, $t = 400$ ч) и восстановительной средах ($T = 1600$ °С, $t = 4$ ч). Фазовый состав кристаллов исследовался методами спектроскопии комбинационного рассеяния света и рентгеновской дифрактометрии. Исследования спектрально-люминесцентных характеристик кристаллов проводили методом оптической спектроскопии.

1. S.P.S. Badwal et al., Solid State Ionics **136-137**, 91 (2000).
2. M.A. Borik et al., J. Alloys Compd. **844**, 156040 (2020).
3. M.A. Borik et al., Opt. Spectrosc. **125**, 898 (2018).
4. S. Omar et al., J. Am. Ceram. Soc. **95**, 1965 (2012).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОХРОМНОГО ЭФФЕКТА В ГЕРМАНАТЕ ВИСМУТА $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

К.Н. Болдырев, А.Д. Молчанова
Институт спектроскопии РАН, Троицк
E-mail: nastyamolchanova@list.ru

Кристаллы германата висмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) обладают уникальными физическими свойствами (фотопроводимость, электрооптические свойства), что делает их перспективными оптическими материалами. Наибольший интерес вызывает фотохромный эффект в этом соединении и исследование его природы [1,2]. Благодаря фоточувствительности и быстрому времени отклика этого кристалла он может использоваться в качестве высокочувствительного материала чтения-записи для фазово-объемной голографии.

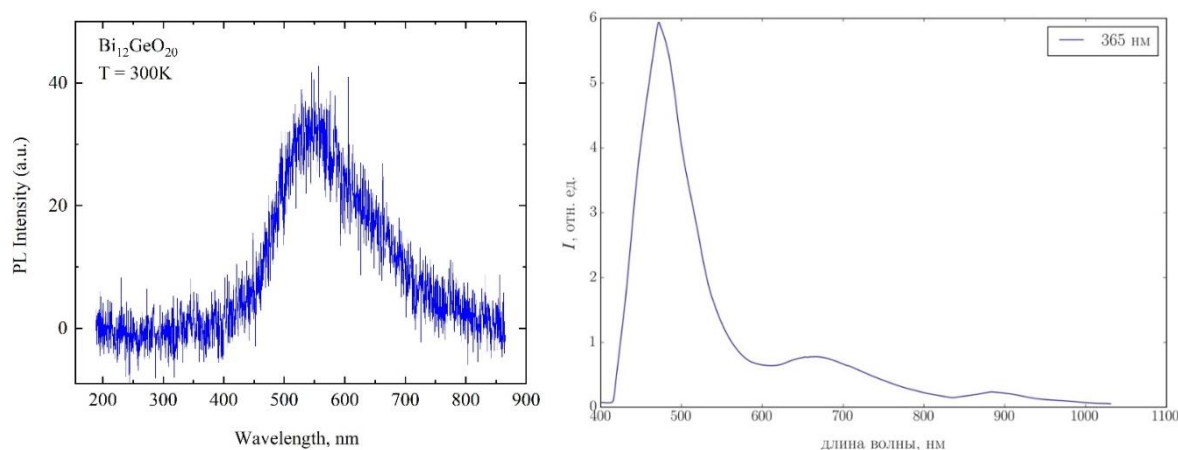


Рис. 1. Спектр рентгенолюминесценции при комнатной температуре (слева) и спектр люминесценции при $T = 10\text{ K}$ (справа, $\lambda_{\text{ext}} = 365\text{ nm}$) BGO.

В настоящей работе проведено комплексное оптическое исследование высококачественного монокристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, выращенного методом Бриджмена (вертикальный вариант). Нами были зарегистрированы спектры поглощения (как без облучения, так и при освещении лазерами различных длин волн и рентгеновским излучением), люминесценции в широком диапазоне частот ($10 - 25000\text{ cm}^{-1}$) и температур ($5 - 300\text{ K}$). Кроме того, впервые был зарегистрирован спектр рентгенолюминесценции монокристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

Данная работа поддержана грантом Российского научного фонда № 21-72-00134.

1. О.А. Гудаев и др. Н Автометрия **5**, 38 (1981).
2. V.M. Skorikov et al., Inorg. Mater. **38**, 172 (2002).

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

Р.И. Аветисов¹, О.Б. Петрова¹, Л.В. Попкова¹, К.И. Рунина¹,
А.Ю. Секачева¹, Van Luong Nguyen², Dinh Trung Do³, Thu Trang Ta³

¹*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

²*Вьетнамско-российский тропический центр, Ханой, Вьетнам*

³*Институт тропической стойкости, Вьетнамско-российский
тропический центр, Ханой, Вьетнам*

E-mail: runinakristina@mail.ru

Одним из возможных применений люминесцентных пленок на основе гибридных материалов (ГМ) является маркировка товаров и ценностей (например, культурных ценностей) для обеспечения защиты от подделки. Техника капиллярного нанесения пленок обеспечивает быстрое, простое и эффективное получение тонких пленок с максимально возможным использованием люминесцентного вещества. Были использованы пленки на основе ГМ, полученного твердофазным синтезом из CaF_2 и 8-оксихинолята лития (Liq), термообработанные при 200 °С. Порошок ГМ диспергировали в изопропанол под воздействием УЗ, заливали в капиллярный фломастер и наносили на поверхности с различной шероховатостью и химической природой (алюминиевую фольгу, дерево, керамику Al_2O_3 , пластик и бумагу) [1]. Пленки проявляют характерную для ГМ на основе 8-оксихинолятов интенсивную широкую полосу люминесценции в области 400-700 нм. С целью защиты от механического повреждения пленки ГМ были покрыты тонким слоем цианоакрилатного клея [2]. Палетки образцов экспонированы во Вьетнамско-Российском тропическом центре в Ханое и Нячанге с марта 2021 года по февраль 2022 года в различных условиях окружающей среды: на травяной и микологической площадках, в продуваемом жалюзийном складе (6 площадок).

Гибридные пленки показали высокую стабильность контура спектра люминесценции. Интенсивность зависела от площадки и материала подложки, наибольшее снижение интенсивности наблюдалось на открытых площадках и на пластике.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.

1. К.И. Рунина и др., Материалы XXVII Международной научной конференции Оптика и спектроскопия конденсированных сред, Краснодар, 179 (2021).
2. M. Zykova et al., Applied Physics A. **128(3)**, 240 (2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КРИСТАЛЛОВ И КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ГАЛОГЕНИДОВ СЕРЕБРА И ТАЛЛИЯ

Л.В. Жукова, В.М. Кондрашин, А.С. Корсаков, А.Е. Львов, П.В. Пестерева,
Д.Д. Салимгареев, И.В. Южаков, А.А. Южакова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

E-mail: v.m.kondrashin@urfu.ru

В связи с активным развитием технологий, требующих внедрения современных материалов, ведутся активные работы по поиску и разработки элементной базы оптики и фотоники. Перед внедрением новых материалов в технологии и устройства, требуется всестороннее исследование их свойств. Одной из наиболее важных задач является исследование радиационной стойкости оптических материалов [1].

В данной работе были исследованы поликристаллические пластинки, полученные методом горячего прессования из высокочистых кристаллов и оптической керамики систем $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54} - \text{AgI}$ и $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26} - \text{AgI}$. Данные материалы были синтезированы впервые в научной лаборатории «Волоконных технологий и фотоники».

Процедуре облучения предшествовало определение спектров пропускания исходных образцов. В ходе предварительной подготовки спектр пропускания кристаллов измерялся на ИК-Фурье-спектрометре IRPrestige-21 (Shimadzu).

В ходе экспериментов исследуемые образцы были облучены электронным излучением дозами до 1 МГр. На каждом из этапов материалы подвергались радиационному воздействию дозой 200кГр, после чего проводилось измерение спектров пропускания образцов. Облучение проводилось в Инновационно-внедренческом центре «Радиационной стерилизации» Уральского федерального университета на новом линейном ускорителе электронов УЭЛР-10-10С с энергией до 10 МэВ.

В ходе проведенных измерений было выявлено, что показатели спектра пропускания кристаллов, облученных дозой 1МГр, остались на прежнем уровне или пренебрежительно мало отличались, по сравнению с исходными образцами. Полученные в ходе эксперимента значения позволяют сделать вывод о высокой радиационной стойкости кристаллов и керамики на основе галогенидов серебра и таллия и больших возможностях для применения этих материалов в высокотехнологичных отраслях промышленности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10108.

1. E. Korsakova et al., *Infrared Physics and Technology* **93**, 171 (2018).

ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ СИСТЕМЫ AgCl – AgBr – AgI ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

С.Е. Барыкина, Д.А. Белоусов, Л.В. Жукова, А.С. Корсаков, А.Е. Львов,
Д.Д. Салимгареев, А.А. Южакова

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

E-mail: d.d.salimagreev@urfu.ru

В настоящее время развитие материальной оптической базы является актуальной задачей. Существует ограниченное количество материалов обладающих высокой способностью спектрального пропускания, не обладающие эффектом спайности, негигроскопичные, пластичные и нетоксичные, а также обладающие фото- и радиационной стойкостью. Одновременное присутствие всех вышеперечисленных свойств оптических материалов позволяет их применять в области медицины.

Наиболее привлекательными материалами, удовлетворяющими всем вышеперечисленным свойствам, являются кристаллы и оптическая керамика на основе галогенидов серебра системы AgCl – AgBr – AgI. Легирование существующих кристаллов системы AgCl – AgBr иодидом серебра позволяет увеличить спектральное пропускание до дальнего инфракрасного диапазона, расширить пропускание в терагерцовом частотном диапазоне, значительно повысить фотостойкость и радиационную стойкость получаемых материалов [1, 2].

Ввиду этого, коллективом авторов были проведены исследования фазовых диаграмм, принадлежащим политермическому разрезу AgCl – AgBr – AgI концентрационного тетраэдра Ag – Cl – Br – I. В результате были установлены области существования устойчивых твердых растворов, где возможно выращивать монокристаллы, а также обнаружены области существования двух кристаллических фаз, где возможно проводить синтез оптической керамики. По полученным результатам были подобраны режимы и выращен монокристалл состава 5 мас. % иодида серебра в твердом растворе AgCl_{0,25}Br_{0,75}. Данный кристалл имеет диапазон спектрального пропускания от 0.4 до 45.0 мкм без окон поглощения с максимальной прозрачностью до 75 %. Полученные результаты являются основой для дальнейшего изготовления методом экструзии инфракрасных световодов, оптических пластин и линз, которые могут с успешностью применяться в медицинских приборах различного назначения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FEUZ-2020-0058 (H687.42Б.223/20).

1. L. Zhukova et al., Opt. Mat. **113**, 110870 (2021).
2. D. Salimagreev et al., Opt. Mat. **125**, 112124 (2022).

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ СИСТЕМ

$TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgI$ И $TlCl_{0,74}Br_{0,26} - AgI$

Л.В. Жукова, А.С. Корсаков, А.Е. Львов, Д.Д. Салимгареев,

Д.В. Шатунова, А.А. Щукина, А.А. Южакова

Уральский федеральный университет им. первого Президента России

Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

E-mail: d.d.salimagreev@urfu.ru

Разработка новых оптических материалов, прозрачных от видимой до дальней инфракрасной области (0.4 – 60.0 мкм), а также в терагерцовом диапазоне (0.05 – 30 ТГц или 6000.0 – 10.0 мкм), является актуальной задачей современной науки. Наиболее перспективными материалами прозрачными в указанных диапазонах являются кристаллы и оптическая керамика на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия. Ввиду этого были проведены исследования по разработке новых оптических керамических материалов на основе систем $TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgI$ и $TlCl_{0,74}Br_{0,26} - AgI$. Для обеих систем были проведены исследования их фазовых диаграмм и установлены области, где возможно выращивать как монокристаллы, так и синтезировать оптическую керамику [1].

Синтез оптической керамики проводили, применяя метод термозонной кристаллизации синтеза (ТЗКС) и метод направленной кристаллизации. На первом этапе применяя метод ТЗКС были синтезированы исходные составы шихты с содержанием иодида серебра в твердом растворе $TlBr_{0,46}I_{0,54}$ в количестве 6, 13, 19 и 25 мол. %, и с содержанием AgI в $TlCl_{0,74}Br_{0,26}$ 7, 14, 20 и 27 мол. %. Далее, из всех составов была синтезирована оптическая керамика на установке ПКБ (Печь конструкции Бриджмена) и методом горячего прессования изготовлены поликристаллические пластины [2]. На данных пластинах были исследованы спектральные характеристики образцов. Установлено, что оптическая керамика системы $TlBr_{0,46}I_{0,54} - AgI$ пропускает от 0.5 до 60.0 мкм без окон поглощения с максимальной прозрачностью 70 %. Керамика системы $TlCl_{0,74}Br_{0,26} - AgI$ прозрачна от 0.5 до 50.0 мкм с аналогичной максимальной прозрачностью.

Таким образом, разработанные новые оптические керамические материалы являются перспективной оптикой для среднего и дальнего ИК диапазона. Следует отметить, что исследование терагерцового пропускания данных материалов является предметом дальнейшего исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10108.

1. D. Salimagreev et al., Opt. Mat. **149**, 107825 (2022).
2. D. Salimagreev et al., Opt. Mat. **125**, 112124 (2022).

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ГРАФИТЕ И ГРАФЕНЕ ПРИ ХОЛОДНОМ СЖАТИИ

Т.К. Петросян, Г.В. Суханова, А.В. Тебеньков, Г.В. Тихомирова
Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург
E-mail: galina.tikhomirova@urfu.ru

В данной работе представлены результаты исследований барических зависимостей проводимости и термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) трёх типов графита (порошкообразный графит малозольный особо чистый (ГМЗ ОСЧ), высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) и природный графит (ПГ) из приангарского месторождения) и двух марок графена при комнатной температуре при давлениях до 50 ГПа. Измерения проводились в камере высокого давления с алмазными наковальнями из синтетических алмазов «карбонадо». Методика позволяет проводить исследование одного и того же образца несколькими циклами увеличения – снижения давления на образец.

На зависимостях $R(P)$ всех образцов графита обнаружен ряд особенностей. Причем если для образцов ГМЗ ОСЧ и ПГ область обнаруженных особенностей несколько размыта и составляет 20-35 ГПа, то для ВОПГ особенности наблюдаются в двух областях давлений - 20-27 и 30-35 ГПа. Наблюдавшиеся особенности связываются с фазовыми переходами в графите при этих давлениях [1, 2].

Исследование ТЭДС является более структурно чувствительным методом, особенности на графиках ТЭДС(P) более ярко выражены, чем для зависимостей $R(P)$. Однако области давлений, в которых обнаружены особенности, совпадают для обеих методик. Из результатов исследования барической зависимости ТЭДС для ВОПГ можно сделать вывод, что возможно получение относительно стабильной углеродной фазы высокого давления.

Для ГМЗ ОСЧ и природного графита данного диапазона давлений и времени обработки давлением недостаточно для окончательного формирования новой фазы. Т.е. фазовый переход в графите при высоком давлении зависит от вида исходного образца.

Зависимости $R(P)$ для графена имеют вид, аналогичный графиту, но величины сопротивления графена почти на порядок выше. Зависимости термоэдс графена и графита от давления имеют похожий характер. В графене также обнаружены особенности термоэдс в диапазоне давлений от ~ 22 ГПа до ~ 34 ГПа.

1. Т.К. Petrosyan, G.V. Tikhomirova, D.K. Kuznetsov, J. Phys.: Conf. Ser. **653**, 012096 (2015).
2. Y. Wang, K.K.M. Lee, Journal of Superhard Materials **34**, 360 (2012).

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М.А. Борик¹, А.В. Кулебякин¹, Е.Е. Ломонова¹, Ф.О. Милович²,
В.А. Мызина¹, Н.Ю. Табачкова^{1,2}, А.С. Числов^{1,2}

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

²*Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», Москва*

E-mail: chislov.artem@bk.ru

Материалы на основе частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) занимают заметное место среди конструкционных неметаллических материалов. Обладая высоким значением твердости и трещиностойкости, тугоплавкостью, способностью работать в условиях агрессивных сред, ЧСЦ может использоваться в самых разных областях науки и техники. Для стабилизации диоксида циркония можно использовать оксиды щёлочноземельных или редкоземельных элементов, однако наиболее широко исследованы материалы, стабилизированные оксидом иттрия. Вместе с тем в последнее время большой интерес вызывают материалы стабилизированные оксидом гадолиния, которые могут использоваться в качестве термобарьерных покрытий, поскольку они обладают низкой теплопроводностью.

Целью данной работы являлось выполнение сравнительного анализа особенностей структуры и механических свойств кристаллов ЧСЦ, стабилизированных оксидами гадолиния и иттрия.

Кристаллы ЧСЦ выращивали методом направленной кристаллизацией расплава в холодном тигле. Были выращены две серии кристаллов, стабилизированных оксидом иттрия или оксидом гадолиния в сопоставимых концентрациях от 2.0 до 4.0 мол.%. Представлены результаты исследования фазового состава, кристаллической структуры, микротвердости и трещиностойкости полученных кристаллов.

Исследование фазового состава показало, что все кристаллы содержат две тетрагональные фазы с различной степенью тетрагональности. Проведена оценка содержания Y_2O_3 и Gd_2O_3 в этих фазах. Обсуждается влияние различий фазового состава кристаллов на механизмы трансформационного упрочнения. Показано, что эффективность трансформационного упрочнения требует сохранения максимального количества тетрагональной фазы и оптимальной трансформационной способности этой фазы. Величина трещиностойкости в значительной степени зависит от микроструктуры и фазового состава материала. В свою очередь, кристаллическая структура сильно зависит от концентрации и вида стабилизирующего оксида.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-01220.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ,
АКТИВИРОВАННЫХ Er^{3+} И ПАРОЙ $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$

Ю.В. Жегучева, Л.М. Савенко, И.В. Степанова

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

E-mail: stepanova.i.v@muctr.ru

Повышенное внимание ученых сосредоточено на материалах, люминесцирующих в телекоммуникационном диапазоне, к числу которых относятся висмутгерманатные стекла. Модифицирование редкоземельными оксидами позволяет расширить спектральный диапазон таких стекол [1]. Текущая работа посвящена исследованию люминесцентных свойств висмутгерманатных стекол, легированных Er^{3+} и $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$.

Были синтезированы стекла 4 составов: $10\text{Bi}_2\text{O}_3-90\text{GeO}_2-0.1\text{Er}_2\text{O}_3$ (без Yb_2O_3) и $10\text{Bi}_2\text{O}_3-90\text{GeO}_2-x\text{Er}_2\text{O}_3-y\text{Yb}_2\text{O}_3$ где $x = 0.01; 0.05; 0.1$ мол. % и $y = 0.05; 0.1; 0.2$ мол. %. Er_2O_3 и Yb_2O_3 вводили в состав стекла сверх 100 %. Исходные оксиды после спекания с промежуточным перетиранием плавил при температуре 1100 °С в течение 30 минут на воздухе и отливали на металлическую подложку. Съемку фотолюминесценции проводили на спектрометре NIR Quest 512 (Ocean Optics) в диапазоне 890-1740 нм, с шагом 1.67 нм при температуре 300 К ($\lambda_{\text{возб}} = 377$ нм).

В спектрах люминесценции солегированных образцов можно выделить 2 характерных спектральных диапазона: 930-1080 нм ($\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$) и 1450-1680 нм (Er^{3+}). Интенсивность люминесценции для разных диапазонов изменяется в зависимости от общего количества редкоземельных ионов и их соотношения. Наиболее интенсивная люминесценция наблюдалась для образца $10\text{Bi}_2\text{O}_3-90\text{GeO}_2-0.1\text{Er}_2\text{O}_3-0.2\text{Yb}_2\text{O}_3$. Сравнение контура люминесценции данного стекла с образцом, легированным только Er_2O_3 , показало, что добавление Yb_2O_3 приводит к уширению диапазона люминесценции: 930-1080 нм ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$) вместо 955-1030 нм (Er^{3+}). Границы второго диапазона сравниваемых образцов остаются неизменными (1450-1680 нм), однако, для солегированного образца ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$) наблюдается выраженное расщепление пика на 1535 нм.

Таким образом, совместное легирование ионной парой $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ позволяет расширить спектральный диапазон люминесценции висмутгерманатных стекол.

1. Y. Luo et al., Front. Optoelectron. **11(1)**, 37 (2018).

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ЗАРЯДОВЫМИ СОСТОЯНИЯМИ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В АЛМАЗАХ

К.Н. Болдырев^{1,2}, В.С. Седов³, Э.С. Сектаров^{1,2}

¹Институт спектроскопии РАН, Троицк

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: sektarov_es@mail.ru

Центры окраски в алмазах широко используются в различных областях науки и могут найти применение в оптической квантовой памяти, квантовой сенсорике, лазерах и квантовой криптографии. Цель этой работы показать, что рентгеновские лучи могут влиять на центры окраски.

В работе исследовался монокристаллический алмаз, содержащий как NV, так и SiV-центры, выращенный CVD методом. Для исследования использовалась спектроскопическая установка на базе фурье-спектрометра высокого разрешения Bruker IFS 125 HR. Источником рентгеновских лучей является рентгеновская трубка БСВ-30 с медным анодом. Номинальная мощность рентгеновской трубки 400 Вт, энергия излучения 8.027 кэВ (Cu K α).

В спектрах, полученных после воздействия рентгеновских лучей, интенсивности линий поглощения изменяются на длинах волн 946 нм (SiV⁰), 737 нм (SiV⁻), 575 нм (NV⁰), 637 нм (NV⁻), соответствующих центрам окраски. На Рис. 1 представлены изменения линий поглощения SiV⁻ (737 нм) (рис. 1(а)), SiV⁰ (946 нм) (рис. 1(б)) после рентгеновского облучения. Видно, что SiV⁻ уменьшается, а SiV⁰ возрастает. Также наблюдается более сложное взаимодействие между NV⁰ и NV⁻. Были рассчитаны изменения концентраций дефектов для SiV и NV.

В этой работе мы продемонстрировали, что рентгеновское излучение может влиять на центры окраски. Данные показали изменения в линиях поглощения NV⁰ (575 нм), NV⁻ (637 нм), SiV⁻ (737 нм) и SiV⁰ (946 нм). Можно сказать, что рентгеновское излучение можно использовать в качестве инструмента для контроля зарядом центров окраски.

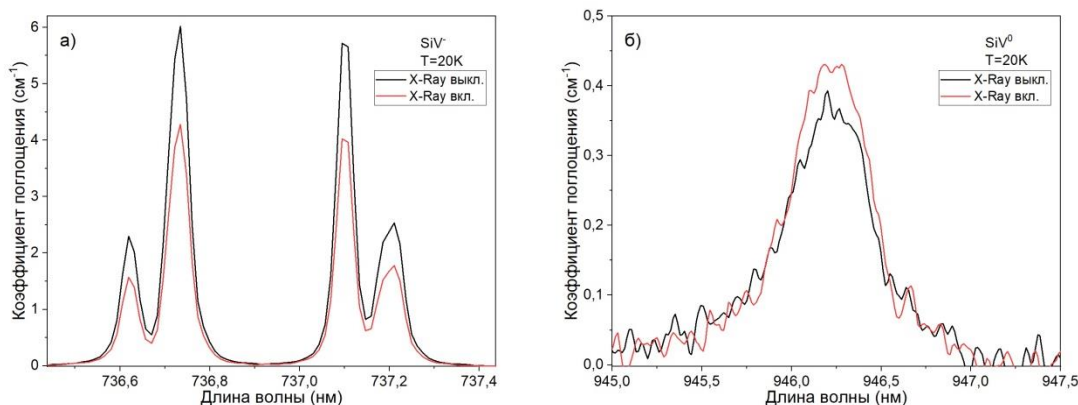


Рис. 1. Сравнение спектров поглощения SiV-центров до и после рентгена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 19-72-10132.

АНАЛИЗ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА КЕРАМИКИ ZrO_2 - Y_2O_3 МЕТОДОМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Н.А. Ларина¹, Е.Е. Ломонова², П.А. Рябочкина¹, Е.И. Чернов³

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

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

³Научно-производственное предприятие «ЭКОН», Обнинск

E-mail: saharova.1996@mail.ru

Керамические материалы на основе диоксида циркония имеют широкий спектр применения во многих областях науки и техники [1, 2]. Например, высокая кислородно-ионная проводимость этих материалов при повышенных температурах делает их пригодными для использования в качестве электролитических мембран в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ), датчиков кислорода в газовых средах [2-4].

Как известно, электропроводность и термомеханические свойства керамических твердых электролитов зависят от технологии их изготовления, а также от характеристик и методов синтеза исходных порошков. С этим могут быть связаны различия в структуре материала и содержании в нем примесей.

В настоящей работе методом фотолюминесцентной спектроскопии исследовался примесный состав керамик $(ZrO_2)_{0.909}(Y_2O_3)_{0.09}(Eu_2O_3)_{0.001}$. Их получали из размолотых плавленых образцов аналогичного состава методом одноосного прессования и шликерного литья. В компактах выявлено наличие неконтролируемой примеси в виде твердого раствора Cr_2O_3 - Al_2O_3 . Методами фотолюминесцентной спектроскопии и конфокальной микроскопии в работе показано, что данная примесь локализуется на поверхности керамик в виде отдельных включений.

С использованием методов рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света также был изучен фазовый состав керамик. Результаты РФА свидетельствуют о том, что компакты, изготовленные различными методами, однофазны и состоят из ZrO_2 кубической модификации с близкими значениями параметров кристаллической решетки. Посторонних фаз не обнаружено. По данным спектроскопии КРС, исследуемые керамики характеризуются структурой t'' -фазы, которая близка к структуре флюорита.

Методом фотолюминесцентной спектроскопии с использованием ионов Eu^{3+} в качестве спектроскопического зонда исследована локальная структура керамик. Выявлено, что локальное кристаллическое окружение ионов Eu^{3+} в керамиках $(ZrO_2)_{0.909}(Y_2O_3)_{0.09}(Eu_2O_3)_{0.001}$, формируемое с участием кислородных вакансий, идентично локальному окружению ионов Eu^{3+} в кристаллах аналогичного состава.

1. U. Peuchert et al., J. Eur. Ceram. Soc. **29**, 283 (2009).
2. N. Mahato et al., Prog. Mater. Sci. **72**, 141 (2015).
3. Y. Mansilla et al., Mater. Today: Proc. **14**, 92 (2019).
4. J.W. Fergus, J. Power Sources **162**, 30 (2006).

СВИНЦОВЫЕ ФТОРОБОРАТНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, СОАКТИВИРОВАННЫЕ Er^{3+} И Lu^{3+}

А.В. Бакаева, Д.А. Бутенков, О.Б. Петрова, К.И. Рунина

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

E-mail: dabutenkov@gmail.com

Оксофторидные стеклокристаллические материалы (СКМ) сочетают в себе лучшие свойства кристаллических фторидов и оксидных стекол, что делает их перспективными для легирования редкоземельными (РЗ) ионами и создания новых лазерных материалов [1]. Высокая эффективность люминесценции оксофторидных СКМ связана с тем, что РЗ-активатор находится во фторидном окружении с низкой энергией фононов кристаллической решетки, что подавляет безызлучательную релаксацию. Возможна гетеровалентная стабилизация высокотемпературной кубической фазы $\beta\text{-PbF}_2$ трехвалентными редкоземельными ионами, которые также вводятся в качестве активаторов в лазерные материалы. Успешное применение этого подхода для соактивирования Nd/La, Eu/Gd было показано в [1, 2], в настоящей работе исследованы кристаллизация и люминесцентные свойства СКМ, соактивированных Er/Lu.

Синтезированы стекла в системе $66\text{PbF}_2-(34-x-y)\text{V}_2\text{O}_3-x\text{ErF}_3-y\text{LuF}_3$ ($x = 0, 0.2, 1, 2, 3, 4$; $y = 0, 1, 2, 3, 3.8, 4$). В качестве исходных реактивов использовали V_2O_3 , PbF_2 , ErF_3 и LuF_3 чистотой не хуже 99.99 масс. %. Стёкла исследовались методами оптической спектроскопии и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Выявлено существенное влияние добавок редкоземельных ионов на характеристические температуры стёкол. СКМ получали путем контролируемой кристаллизации стекол в различных температурно-временных условиях на основании данных ДСК.

Люминесценция СКМ и исходных стёкол снята при возбуждении лазером на длине волны 377 нм и 973 нм. В ИК-области с ростом температуры и длительности термообработки возрастает интенсивность эмиссии на переходе ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ иона Er^{3+} . Спектр излучения на сверхчувствительном переходе ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (550 нм) претерпевает сильные изменения в зависимости от химического и фазового состава. Эти результаты свидетельствуют о смене окружения ионов Er^{3+} за счёт их вхождения в различные кристаллические фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание FSSM-2020-0003.

1. O.V. Petrova et al., *J. Non-Cryst. Sol.* **531**, 119858 (2020).
2. Д.А. Величина и др., *Стекло и керамика* № 1, 16 (2021).

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ЭЛЕКТРОПРОДНОСТЬ ПЛЕНОК ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

С.В. Васин¹, М.С. Ефимов², В.А. Сергеев^{1,2}

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Ульяновск

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск
E-mail: efimovmix@mail.ru

Нанокompозитные пленки поливинилового спирта с многостенными углеродными нанотрубками (ПВС-МУНТ) обладают рядом уникальных свойств, позволяющих их использовать как основу датчиков различных физических величин [1]. Нами исследовалось влияние влажности на электропроводность пленок ПВС-МУНТ. Для получения пленок ПВС-МУНТ 10 % водный раствор ПВС марки 16/1, полученный непрерывным перемешиванием ПВС в течении часа при температуре 90 °С путем ультразвукового перемешивания смешивался с 5 % водным раствором МУНТ, полученных на установке УЛГТУ и функционализированных прививкой карбоксильных групп [2]. Пленки получали путем вытягивания из раствора подложки ИТО. На поверхность пленок методом вакуумного напыления наносились алюминиевые контакты.

Из графиков вольтамперных характеристик пленок ПВС-МУНТ при различной влажности над раствором глицерина [3] (рис. 1) следует, что при повышении влажности пленка ПВС-МУНТ активно впитывает влагу и ее электропроводность, и крутизна ВАХ сильно растет.

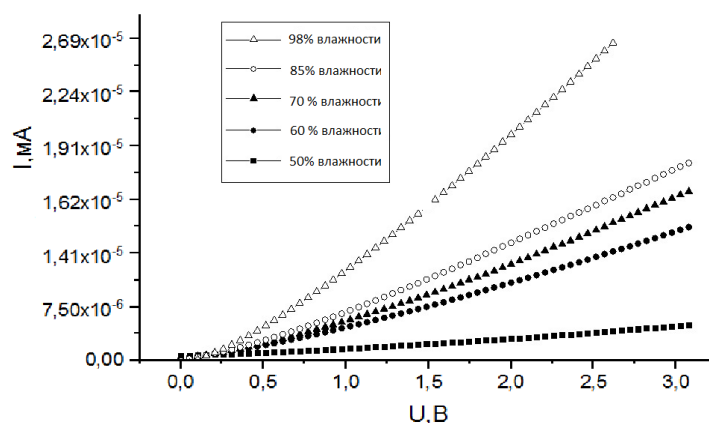


Рис. 1. ВАХ пленок при изменении влажности и постоянной температуре

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта № 19-42-730011.

1. С.В. Васин, М.С. Ефимов, В.А. Сергеев, ПЖТФ **46**, 26 (2020).
2. Е.С. Климов, М.В. Бузаева, О.А. Давыдова, Журнал прикладной химии **87**, 1128 (2014).
3. ГОСТ 29244-91, Пластмассы. Небольшие контейнеры для кондиционирования и испытания с использованием водных растворов для поддержания постоянного значения относительной влажности.

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В КВАЗИБИНАРНОЙ СИСТЕМЕ PbF₂ - EuF₃

М.О. Анурова¹, С.С. Зыкова², М.Н. Маякова^{2,3}, О.Б. Петрова², К.И. Рунина²

¹Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус», Фрязино

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: zykova-sc@mail.ru

Фторидные соединения и твёрдые растворы в системах MF₂ - REE₃ (REE – редкоземельный элемент) привлекают всё больше внимание из-за возможности их использования в качестве фотонных материалов и люминофоров. Отличительной чертой этих систем является наличие широкой области кристаллизации кубической фазы – тип флюорита *Fm3m*, которая составляет более 20 мол. % REE при 650 – 700 °C [1]. Наряду с этим во многих системах предполагается наличие ромбоэдрической упорядоченной фазы (R-фаза), которая существует в узком диапазоне концентраций около 40 мол. % REE. Из-за их схожести возникает проблема идентификации рассматриваемой фазы «ромбоэдрического флюорита» [2].

Целью настоящей работы является синтез и изучение образцов состава Pb_{1-x}Eu_xF_{2+x}, с введением EuF₃ в концентрациях 35-45 мол. %, при которых предполагается получение R-фазы. Образцы получали твердофазным синтезом при 550 °C во фторирующей атмосфере и методом соосаждения из водных растворов нитратов. В качестве исходных реактивов использовали Pb(NO₃)₂, Eu(NO₃)₃·6H₂O, PbF₂, EuF₃, HF не хуже 99.99 масс. %. На основании результатов РФА был проведён расчёт параметра элементарной ячейки. Рентгеноспектральный микроанализ позволил выявить отклонения от номинальных составов образцов, которое составляет не более 0.05 ат. % для Pb и Eu. С целью получения более глубокого представления о кристаллической структуре синтезированных образцов проведен анализ спектров комбинационного рассеяния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Госзадание FSSM-2020-0005

1. A.K. Tyagi et al., J. Solid State Chem. **177**, 1746 (2004).
2. O.V. Petrova et al., J. Lumin. **238**, 118262 (2021).

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СТЕКЛА $\text{BaO-V}_2\text{O}_3\text{-Vi}_2\text{O}_3$ И Er:YAG

К.В. Балужева, К.Ф. Игнатова, М.Е. Комшина, А.М. Кутыин, А.Д. Плехович,
Е.Е. Ростокина

*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН,
Нижний Новгород*

E-mail: ignatova@ihps-nnov.ru

Одними из ключевых материалов квантовой электроники и лазерной инженерии, являются керамики на основе алюмоиттриевого граната, легированного ионами редкоземельных элементов (RE:YAG). Основопологающей проблемой в этом направлении является получение материалов с нулевой пористостью, высокой фазовой и химической чистотой. Альтернативным подходом к решению имеющихся проблем является разработка стеклокерамических материалов на основе Er:YAG .

Данная работа посвящена исследованию химических и фазовых превращений, а также поиску оптимальных режимов термообработки при получении новых стеклокерамик на основе Er:YAG и стекла системы $\text{BaO-V}_2\text{O}_3\text{-Vi}_2\text{O}_3$, выбранного с использованием базы данных SciGlass исходя из ряда физико-химических характеристик: T_g , ρ , показателя преломления n .

Для исследований была использована керамика состава $(\text{Y}_{0.5}\text{Er}_{0.5})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, прошедшая высокотемпературную обработку при 1100°C , и стекло состава $20\text{Vi}_2\text{O}_3\text{-}65\text{V}_2\text{O}_3\text{-}15\text{BaO}$.

Методом горячей пропитки в разных температурных режимах от 700 до 1300°C получена серия образцов стеклокерамики $\text{BaO-V}_2\text{O}_3\text{-Vi}_2\text{O}_3\text{-Er:YAG}$. Методом ДСК и РФА обнаружены и исследованы процессы, сопровождающие формирование стеклокерамического материала при термической обработке. На термограмме смеси стекла и граната Er:YAG при температурах от 650°C до 1020°C наблюдается образование $(\text{Y,Er})\text{VO}_3$, а при $T = 1050^\circ\text{C}$ – характерный пик формирования фазы Er:YAG , обусловленный ресинтезом из $(\text{Y,Er})\text{VO}_3$. Нагрев свыше 1300°C приводит к убыли массы за счет испарения компонентов стекла. Предположительно происходит распад $(\text{Y,Er})\text{VO}_3$, а образующийся V_2O_5 улетучивается вследствие его низкой устойчивости в данных условиях.

Проведено исследование поверхности полученных образцов методом сканирующей электронной микроскопии. На микрофотографиях наблюдается значительное увеличение размера и количества пор с ростом температуры.

Важно отметить, что образующаяся кристаллическая фаза YVO_5 представляет интерес в качестве матрицы для люминофоров, что открывает широкие перспективы для стеклокерамики, представленной в данной работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-73-10110).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНАТО-БОРАТОВ ЛАНТАНА-ГАДОЛИНИЯ, СОЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Yb^{3+} , Er^{3+}

М.Г. Комова¹, В.А. Крутько¹, К.В. Петрова¹, Д.В. Поминова²

¹Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва

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

E-mail: kroutko@igic.ras.ru

Термостойкие германатобораты $\text{Ln}_{14}\text{Ge}_2\text{B}_6\text{O}_{34}$ со структурной формулой $\text{Ln}_{14}\text{O}_8(\text{GeO}_4)_2(\text{BO}_3)_6$ кристаллизуются в тригональной сингонии (пр.гр. $R\bar{3}_1$), что подразумевает у них наличие нелинейно-оптических, гиротропных и других функциональных свойств [1]. Эти оксиды подходят для создания люминофоров различных спектральных диапазонов [2, 3].

В данной работе жидкофазным путем (соосаждением с последующим отжигом интермедиатов) получена серия однофазных германатоборатов лантана-гадолия (ГБЛГ) $\text{La}_3\text{Gd}_{11-x-y}\text{Ge}_2\text{B}_6\text{O}_{34}:\text{Yb}_x, \text{Er}_y$. Исследованы спектрально-люминесцентные свойства полученных материалов. Зарегистрированы спектры ап-конверсионной люминесценции при излучательных переходах $^2\text{H}_{11/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ и $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ионов Er^{3+} в синтезированных ГБЛГ при инфракрасном (ИК) лазерном возбуждении в полосу поглощения Yb^{3+} ($\lambda = 974$ нм). Определены значения энергетического выхода (Вен, %) всех синтезированных люминофоров (рис. 1 (а)) и оптимальные соотношения концентраций Yb^{3+} и Er^{3+} для получения наиболее ярких люминофоров. Концентрацию активных ионов в составе люминофоров контролировали методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Определена микроморфология люминофоров ГБЛГ (рис.1 (б)).

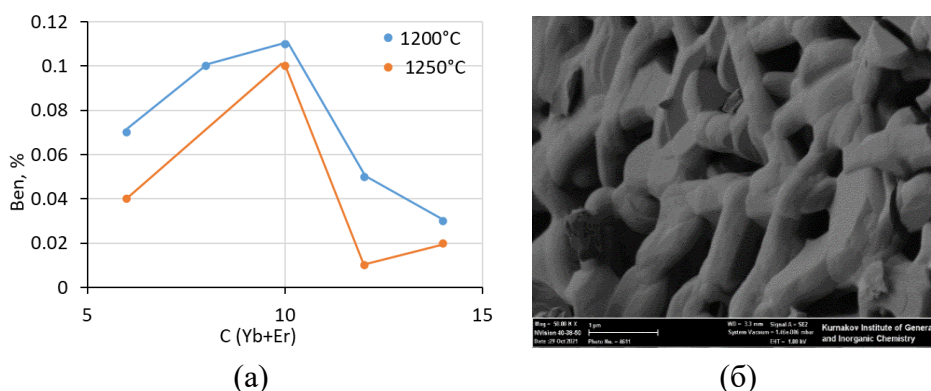


Рис. 1. (а) – зависимость Вен, % ГБЛГ от суммарной концентрации легирующих примесей; (б) – микроморфология ГБЛГ.

Исследования проводились при бюджетном финансировании с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН и поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-3098.2022.1.2).

1. J.H. Zhang et al., J. Solid State Chem. **195**, 63 (2012).
2. В.А. Крутько и др., Неорган. мат. **38**, 1364 (2002).
3. A. Ryabova et al., Photonics & Lasers in Med. **2**, 117 (2013).

О РАСПРОСТРАНЕННЫХ И РЕДКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГРУППАХ УПАКОВОК СИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ ЕДИНИЦ В КРИСТАЛЛАХ

А.А Пакулева, Н.В Сомов, Е.В. Чупрунов

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

E-mail: pakuleva1999@mail.ru

Предметом данного исследования является исследование свойств наиболее часто встречающихся в природе (распространенных) и «редких», а также «пустых» по терминологии В.С.Урусова [1] пространственных групп симметрии кристаллов.

В настоящей работе рассматриваются кристаллы, атомная структура которых может быть представлена в виде упаковки отдельных структурных единиц конечного объема. Это приводит к появлению геометрических ограничений на возможное расположение в кристаллическом пространстве таких структурных единиц, обусловленных тем, что расстояние между двумя атомами не может быть меньше суммы их кристаллографических радиусов.

Для каждой из 230 пространственных групп симметрии имеются свои ограничения на расположение атомов в кристалле [2].

Симметричные структурные единицы могут располагаться в кристаллическом пространстве по частным орбитам пространственных групп. Для этого необходимо, чтобы структурная единица характеризовалась некоторой нетривиальной точечной группой собственной симметрии.

В данной работе приводятся результаты вычислений запрещенных объемов в кристаллическом пространстве для частных орбит некоторых пространственных групп симметрии, анализ соотношения собственной симметрии структурных единиц и сопоставление результатов данного анализа с данными, содержащимися в международных базах структурных данных.

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках госзадания № 0729-2020-0058.

1. В.С. Урусов, Т.Н. Надежина, Журнал структурной химии **50**, 26 (2009).
2. Н.В. Сомов, Е.В. Чупрунов, Кристаллография, 2020.

ВЛИЯНИЕ ОКСИДА НАТРИЯ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВИСМУТГЕРМАНАТНЫХ СТЕКОЛ

Д.В. Волкова, К.С. Серкина, И.В. Степанова, А.А. Трофимова
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва
E-mail: stepanova.i.v@muctr.ru

С момента открытия уникальных люминесцентных свойств германатных стекол, легированных висмутом, исследование свойств стекол данной системы является актуальной научной задачей. Модифицирование оксидами щелочных металлов позволяет снизить температуру синтеза и улучшить оптическое качество стекол [1]. Цель данной работы – исследование влияния оксида натрия на свойства висмутгерманатных стекол.

Был проведен синтез двух серий стекол с различным содержанием щелочного оксида $x\text{Bi}_2\text{O}_3 - (95-x)\text{GeO}_2 - 5\text{Na}_2\text{O}$ и $x\text{Bi}_2\text{O}_3 - (90-x)\text{GeO}_2 - 10\text{Na}_2\text{O}$, где $x = 1, 2, 3, 4, 5$ мол. %. Дважды спеченную шихту выдерживали при $t = 1100$ °С в течение 30 минут, затем расплав отливали на стальную подложку комнатной температуры. Плотность измеряли гидростатическим методом (весы MERCURY M-ER 123ACF), для измерения показателя преломления использовался иммерсионный метод (микроскоп МИН-8, иммерсионные жидкости Cargille Labs) и метод рефрактометра (рефрактометр МЕГЕОН 72022).

Синтезированные висмутгерманатные стекла имеют хорошее оптическое качество, с увеличением содержания оксида висмута для стекол обеих серий заметно появление красной окраски, косвенно указывающей на наличие висмутовых активных центров [2].

В таблице 1 приведены значения физических свойств (плотности и показателя преломления) для двух серий стекол. Как видно, с увеличением содержания оксида висмута происходит постепенное возрастание значений плотности и показателя преломления.

Таблица 1. Физические свойства синтезированных стекол

Содержание, мол. %	Плотность, г/см ³ ±0.05					Показатель преломления n_D , ±0.01				
	$\text{Bi}_2\text{O}_3 \rightarrow$					$\text{Bi}_2\text{O}_3 \rightarrow$				
$\text{Na}_2\text{O} \downarrow$	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5	4.08	4.09	4.13	4.21	4.34	1.67	1.68	1.70	1.72	1.73
10	4.09	4.09	4.15	4.37	4.40	1.67	1.70	1.72	1.73	1.74

Сравнение стекол с различным содержанием Na_2O показывает, что все физические характеристики имеют более высокие значения для образцов с 10 мол. % Na_2O . Данное явление связано с «германатной аномалией», характерной для стекол исследуемой системы [1].

1. T.N. Ivanova, V.N. Bykov, Russian Metallurgy **8**, 678 (2010).
2. Y. Fujimoto, J. American Ceramic Society **93**, 581 (2010).

ВЫСОКОЧИСТЫЕ СТЕКЛА $\text{TeO}_2\text{-ZnO}$ ЛЕГИРОВАННЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

И.Х. Аветисов, Д.А. Бутенков, М.Б. Гришечкин, Т.С. Летягин,
К.И. Рунина, В.А. Соломатина

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва
E-mail: viktoria20000000@mail.ru

Оптические материалы на основе высокочистых веществ востребованы в качестве функциональных при изготовлении оптоволоконных и оптоэлектронных устройств в фотонике, волоконной, силовой, нелинейной оптике. Необходимым условием их применения в указанных областях является высокая оптическая прозрачность материала и низкие оптические потери. Новым направлением в среднем ИК диапазоне является использование активных волокон, которую играют двойную роль нелинейной и усилительной среды. [1] Большой интерес представляют стекла системы $\text{TeO}_2\text{-ZnO}$ легированные редкоземельными ионами.

В рамках работы были синтезированы высокочистые стекла $\text{TeO}_2\text{-ZnO}$ разного состава, легированные редкоземельными ионами. Для синтеза шихты использовали высокочистый ZnO 5N (по 67 примесям), полученный методом осаждения из азотнокислого раствора [2] с последующим отжигом в атмосфере кислорода, и высокочистый TeO_2 5N (по 64 примесям), полученный методом газотранспортной реакции [3]. Синтез проводили в платиновом тигле в муфельной печи в потоке кислорода. В качестве легирующих добавок использовали Er_2O_3 , Yb_2O_3 , Nd_2O_3 .

Исследованы физические свойства полученных стекол: микротвердость, спектры пропускания, спектры люминесценции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант FSSM-2020-0005.

1. А.П. Савикин и др., Неорганические материалы **50**, 1261 (2014).
2. В.А. Соломатина и др., Молодежь и наука: шаг к успеху **4**, 108 (2021).
3. E. Sukhanova et al., Journal of Alloys and Compounds **855**, 1 (2021).

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМЕ $\text{PbF}_2\text{-YF}_3$ НА ОСНОВЕ 8-ОКСИХИНОЛЯТА ЛИТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

М.Ю. Андреева¹, М.Н. Маякова^{1,2}, О.Б. Петрова¹, П.В. Стрекалов¹

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

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

E-mail: strekalov_pavel@mail.ru

Люминесцентные органо-неорганические гибридные материалы (ГМ) содержат нанокластеры высокоэффективного органического люминофора в стабильной неорганической матрице. На основе PbF_2 -содержащих матриц были синтезированы ГМ методом соосаждения [1] с использованием в качестве органического компонента 8-оксихинолята лития (Liq). В системе $\text{PbF}_2\text{-RE}_x\text{F}_3$ (RE = редкоземельный элемент) могут образовываться твердые растворы кубической фазы $\text{Pb}_{1-x}\text{RE}_x\text{F}_{2+x}$ типа флюорита *Fm3m*, образование твердого раствора стабилизирует кубическую фазу.

Синтез ГМ в системе фторид свинца – фторид иттрия – 8-оксихинолят лития проводили методом соосаждения из водных растворов. На данном этапе исследовали влияние на результат синтеза различных условий соосаждения: концентрации исходных компонентов, соотношения компонентов и порядка подачи реагентов. В результате соосаждения получали порошкообразные препараты, содержащие как низкотемпературную ромбическую фазу $\alpha\text{-PbF}_2$, так и твердые растворы на основе кубической фазы $\beta\text{-PbF}_2$ в зависимости от концентрации RE и условий синтеза.

Стабильные однофазные порошки с кристаллической кубической структуры получали при номинальных концентрациях YF_3 20-25 мол. %. Для этих образцов были изучены спектры фотолюминесценции (ФЛ) на спектрофлуориметре Fluorolog 3D (Horiba Jobin Yvon) при возбуждении 377 нм. Наиболее интенсивной ФЛ обладает ГМ, полученный прямым соосаждением с номинальной концентрацией YF_3 25 мол. % и концентрацией исходного раствора нитратов 0.8 М. Спектры ГМ заметно сдвинуты в коротковолновую область относительно исходного Liq. Коротковолновая составляющая явно не связана с центрами 8-оксихинолятов иттрия или свинца, которые демонстрируют ФЛ в более длинноволновой области по сравнению с Liq. Кроме того, центр нельзя отнести к специфическим связям в кубической фазе PbF_2 . Таким образом, ГМ, полученные из тройной системы, очень перспективны, благодаря интенсивной и очень коротковолновой ФЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.

1. П.В. Стрекалов и др., Цветные металлы № 10, 25 (2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ФТОРИДА СВИНЦА И ФТОРИДА ИТТЕРБИЯ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

М.Н. Маякова^{1,2}, О.Б. Петрова¹, К.И. Рунина¹, П.В. Стрекалов¹

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

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

E-mail: strekalov_pavel@mail.ru

Системы $\text{MF}_2\text{-REF}_3$ (где $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Pb}$, $\text{RE} =$ редкоземельный элемент) формируют твердые растворы $\text{M}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ кубической структуры типа флюорита *Fm3m*. Область кристаллизации таких твердых растворов при высоких температурах достигает 50 мол. % REF_3 . Исследование фазообразования в системах с PbF_2 осложнено наличием у него полиморфизма, не свойственного другим фторидам двухвалентных металлов [1]. Была выбрана система, содержащая иттербий, поскольку со спектроскопической точки зрения иттербий имеет ряд преимуществ: для ионов Yb^{3+} отсутствует концентрационное тушение люминесценции, степень легирования иттербием может быть очень высокой благодаря наличию только двух электронных уровней $^2\text{F}_{7/2}$ и $^2\text{F}_{5/2}$.

Произведен синтез порошков в системе $\text{PbF}_2\text{-YbF}_3$ методом сосаждения из водных растворов нитрата свинца (II) и нитрата иттербия (III). В качестве фторирующего агента был выбран фторид аммония. Синтез проводили прямым, обратным и совместным осаждением, в зависимости от порядка смешения растворов. В результате соосаждения в системе $\text{PbF}_2\text{-YbF}_3$ получены порошки, по своей кристаллической структуре соответствующие низкотемпературной ромбической фазе – $\alpha\text{-PbF}_2$ и высокотемпературной кубической фазе – $\beta\text{-PbF}_2$. При совместном добавлении реагентов, а также при концентрации раствора нитрата свинца равной 0.8 М происходит образование двухфазного образца. А при обратном методе добавления реагентов с концентрацией раствора нитрата свинца равной 1.43 М с увеличением количества содержания иттербия происходит стабилизация кубической фазы фторида свинца.

Спектр люминесценции представляет собой полосу с тремя явно выраженными максимумами на длинах волн 971, 977, 993 нм, которые соответствуют переходам электронов с возбужденного уровня $^2\text{F}_{5/2}$ на штарковские подуровни основного уровня $^2\text{F}_{7/2}$ в ионах Yb^{3+} . Максимальная интенсивность люминесценции наблюдается у образца с концентрацией ионов Yb^{3+} 25 мол. %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, Госзадание FSSM-2020-0005.

1. O.B. Petrova et al., Journal of Luminescence **238**, 118262 (2021).

СОПОСТАВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ, ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ЭКСТРУЗИИ И ИСКРОВОГО
ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

М.В. Воронов¹, М.Г. Лаврентьев^{2,3}, В.П. Панченко¹, Ю.Н. Пархоменко^{2,4},
Н.Ю. Табачкова^{2,5}

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», Москва

³ООО «РМТ», Москва

⁴Государственный научно-исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва

⁵Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: ntabachkova@misis.ru

Твердые растворы на основе теллурида висмута и сурьмы широко используются для создания приборов систем охлаждения, а также для генераторов электроэнергии при температурах до 300 °С. Термоэлектрические материалы, работающие в генераторах электроэнергии, могут испытывать механические напряжения, возникающие из-за достаточно большой разности температур горячей и холодной сторон термоэлемента. В настоящей работе методом динамического одноосного сжатия исследована зависимость прочностных характеристик поликристаллических образцов $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$, полученных методами экструзии и искрового плазменного спекания (SPS), а также материалов полученных экструзией в установке SPS. Методами рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии исследован фазовый состав и структура исходных образцов.

Анализ полученных результатов показывает, что методом SPS возможно получение хорошо спеченного, механически прочного материала, не содержащего пор и трещин даже при относительно низком давлении ~ 50 МПа. Показано, что прочность образцов, полученных SPS, при комнатной температуре практически в два раза превышает прочность образцов, полученных методом экструзии. Обсуждаются закономерности, характеризующие поведение материала при деформации. По сравнению с традиционным методом горячей экструзии, проведение экструзии в установке SPS увеличивает остроту текстуры материала. При этом прочностные характеристики такого экструдированного материала сопоставимы с характеристиками материала, полученного SPS. При комнатной температуре прочность экструдированных в SPS образцов составляла ~ 200 МПа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90051. Исследование структуры выполнено на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» при финансовой поддержке РФ в лице Минобрнауки (№ 075-15-2021-696).

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРНЫЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ «CORE/SHELL» НАНОЧАСТИЦ β -NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺@SiO₂

Н.А. Архарова, Д.Н. Каримов, А.В. Кошелев, А.С. Орехов
ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва
E-mail: orekhov.anton@gmail.com

Гидрофильные гетероструктурированные частицы NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺@SiO₂ являются модельными объектами в медицинских и биологических приложениях [1-3]. Однако, несмотря на многообразие методик получения частиц со структурой «ядро/оболочка», проблема воспроизводимости синтеза и контролируемости размера, формы и морфологии таких нанообъектов остается открытым. В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии изучено влияние параметров синтеза (температура, соотношение исходных компонентов, время) на кристаллическое совершенство частиц NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺@SiO₂.

Исходные частицы размером 30-50 нм β -NaYF₄: Yb³⁺, Tm³⁺ синтезировали сольвотермальным методом из фторацетатных прекурсоров. Оболочка SiO₂ толщиной 2-10 нм наносилась модифицированным методом Штобера. Изучение наночастиц проводили комплексом методов рентгенофазового, электронно-микроскопического и люминесцентного анализа.

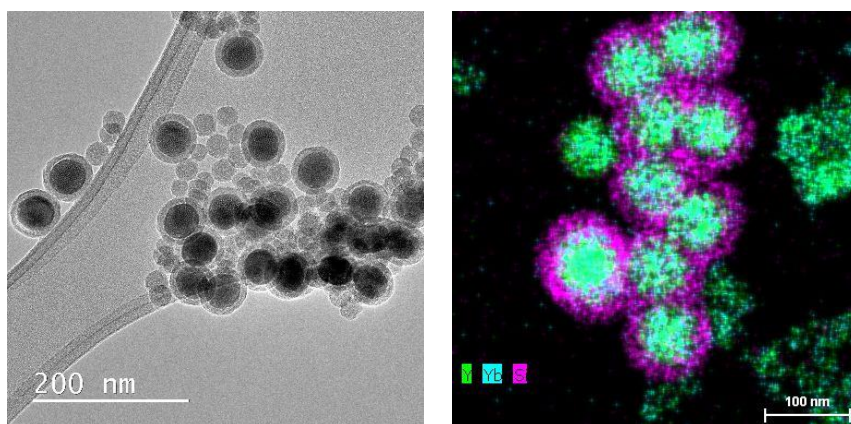


Рис.1. ПЭМ изображение (слева) и элементное картирование (справа) синтезированные гетероструктурированных наночастиц.

Определены временные, концентрационные и температурные параметры синтеза. В докладе обсуждаются оптимальные параметры синтеза изученных наночастиц с контролируемыми характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 22-79-10285.

1. A. Generalova, B. Chichkov, E. Khaydukov, *Advances in colloid and interface science* **245**, 1 (2017).
2. J. Zhang et al., *Macromolecules* **48**, 2054 (2015).
3. Д.Н. Каримов и др. *Российские нанотехнологии* **15**, 699 (2020).

ОСОБЕННОСТИ КОЛЛОИДНО-ХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЛЮМИНОФОРОВ $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$

Н.В. Варапай¹, В.А. Журавков², Г.П. Шевченко²

¹Институт физики НАН Беларуси, Минск

²НИИ физико-химических проблем БГУ, Минск

E-mail: n.varapay@ifanbel.bas-net.by

Основным преимуществом получения люминофоров методом соосаждения, по сравнению с твердофазным синтезом, является возможность воздействия на свойства конечного продукта посредством контроля процесса выделения и термообработки прекурсора [1].

Было установлено, что для получения беспримесной матрицы SrAl_2O_4 из прекурсора, состоящего из совместно осажденных гидроксидов (СОГ) стронция и алюминия (осадитель – $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), необходим 2-кратный избыток солей стронция (по отношению к стехиометрии $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) и температура 0°C . Это связано с высокой растворимостью $\text{Sr}(\text{OH})_2$ (25°C – 2.25 г и 0°C – 0.41 г на 100 г). При использовании в качестве осадителя NH_4HCO_3 , вследствие низкой растворимости SrCO_3 (25°C – 0.002 г на 100 г), фаза SrAl_2O_4 формируется в соответствии со стехиометрией $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Оптимальным pH осаждения прекурсора СОГ является интервал 8.5 – 9.5. Высокотемпературное прокалывание (не менее 2-х часов) в интервале 1300 – 1500°C приводит к увеличению интенсивности люминесценции образцов 2 – 2.5 раза.

Показано, что использование коллоидно-химического подхода к синтезу люминофоров алюминатов стронция, активированных ионами Ce^{3+} и Mn^{2+} (рис. 1) позволяет значительно влиять на их люминесцентные свойства. В литературе такие данные отсутствуют.

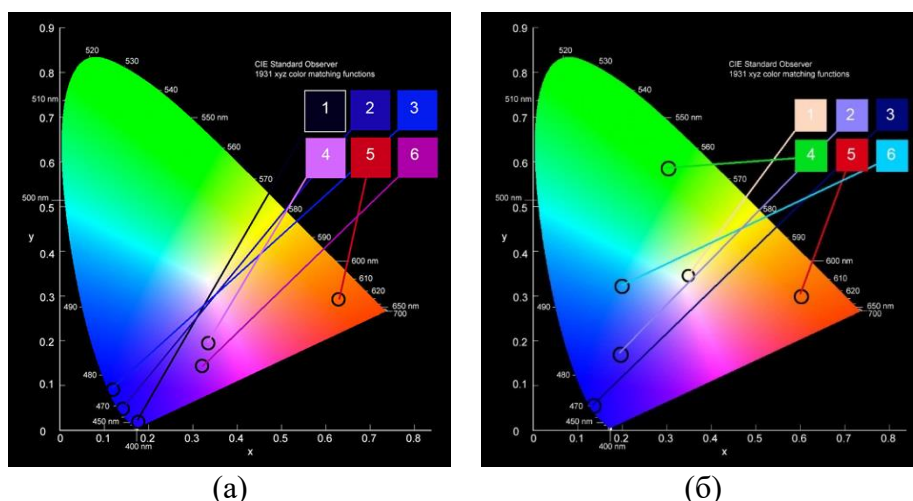


Рис. 1. Диаграмма цветности образцов алюминатов стронция, активированных ионами Ce^{3+} и Mn^{2+} , полученных твердофазным (а) и коллоидно-химическим (б) методами синтеза.

1. Ю.В. Бокшиц, Журнал Белорусского государственного университета **1**, 74 (2017).

АП-КОНВЕРСИОННЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЛЮМИНОФОРОВ $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Er}, \text{Yb}$ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

С.А. Букарев, С.В. Гущин, А.М. Кузьмин, А.А. Ляпин, М.В. Чернов
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, Саранск
E-mail: s.bukarev@phts.ru

Современные солнечные батареи на основе различных фоточувствительных элементов (кремний, перовскиты, органические красители и др.) работают в достаточно узком спектральном диапазоне длин волн, который соответствует 0.3 – 1.1 мкм, что серьезно ограничивает верхний предел их чувствительности. Одним из способов повышения эффективности солнечных батарей является создание комбинированных ячеек с использованием материалов, в которых под действием, прошедшего через солнечную ячейку ИК-излучения, возникает ап-конверсионная люминесценция в видимой и ИК областях спектра, излучение которой также поглощается солнечной батареей [1-3].

В настоящей работе объектами исследования являлись композитные пленки на основе люминофора $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Er}, \text{Yb}$ и полиэтилена, полученные с помощью метода экструзии.

При возбуждении на уровень $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} пленки обладают интенсивной ап-конверсионной люминесценцией в видимой и инфракрасной области спектра, которая соответствует электронным переходам $^4\text{G}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{5/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ ионов Er^{3+} и $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ ионов Yb^{3+} . В работе были определены количественные характеристики ап-конверсионной люминесценции пленки: энергетический выход, координаты цветности и коррелированные цветовые температуры.

Применение полученной ап-конверсионной пленки в конструкции двухсторонних кремниевых солнечных элементов позволило увеличить ток короткого замыкания на 10.5 %.

1. P. Gibart, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 4401 (1996).
2. A. Shalav et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 13505 (2005).
3. B.S. Richards, A. Shalav, IEEE Trans. Electron. Devices **54**, 2679 (2007).

NEW FUNCTIONAL MATERIALS

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES
OF THE $B_2O_3-Al_2O_3-(Y_{1-x}Yb_x)_2O_3 + Cr_2O_3 + M_2O$ GLASSES

N.V. Golubev³, E.S. Ignatieva³, V.V. Kouhar¹, G.E. Malashkevich¹,
P.P. Pershukevich¹, V.N. Sigaev³, I.V. Stanisheuski², M.Z. Ziyatdinova³
³*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*
¹*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*
²*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*
E-mail: g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by

Cr^{3+} ions due to their broad absorption bands in the ultraviolet and visible spectral regions and luminescence in the red and near-infrared regions are of undoubted interest for use in luminescent concentrators of solar radiation. However, because of the relatively low luminescence quantum yield (η), which does not exceed 25% at room temperature [1], Cr-containing glasses for practical use are usually co-activated by effectively luminescent rare-earth ions, in particular, by Yb^{3+} ions [2]. Earlier it was shown that among oxide matrices yttrium-alumoborate glasses with composition near stoichiometry of huntite ($CaMg_3(CO_3)_4$) are characterized by record high value of minimal distance between rare-earth activator ions (≈ 0.67 nm) [3]. This contributes to a decrease in the efficiency of concentration quenching of luminescence in them. As a result, Yb^{3+} ions in such glasses not subjected to forced dehydration account for 80 % at Yb_2O_3 concentration equal to 0.5 mol. % and decrease by no more than 20 % when the latter is increased to 2 mol. % [4]. It was shown in the recent publication [5] that in similar glasses additionally doped with silicon chromium is realized mainly in oxidation degree Cr(III) with an appreciable admixture of Cr(IV) and Cr(V) which plays a role of internal filter and quencher of Cr(III) luminescence, and the quantum yield of Yb^{3+} sensitized luminescence does not exceed 32 %. Therefore, the present work attempts to find ways to increase the η value for such glasses and to find out their suitability as a luminescent converter of solar radiation in the near-infrared region of the spectrum.

The studied glasses were synthesized by melting the charge mixture in a laboratory resistance furnace with SiC heaters in a platinum crucible at $T \approx 1400$ °C in air for 60 minutes. As the initial components we used Yb_2O_3 (extra pure), Y_2O_3 (extra pure), Cr_2O_3 (chem. pure), $Al(OH)_3$ (analytical grade), Na_2CO_3 , K_2CO_3 , $CsNO_3$ (all are chem. pure), H_3BO_3 (extra pure). The melt was barbotaged with dry oxygen to minimize the concentration of OH^- -groups which quench the luminescence of both Cr^{3+} and Yb^{3+} .

Absorption, luminescence, and luminescence excitation spectra were recorded on a Cary-500 spectrophotometer and a Fluorolog-3 spectrofluorimeter, respectively. Luminescence kinetics was studied using a Tektronix TDS3032B digital oscilloscope at excitation by the radiation of tunable monopulse lasers. The spectral curves were decomposed into individual components using the Nelder-Mead gradient-free optimization method. The quantum yield of luminescence was determined by the absolute method and by

comparison with the reference, and its dependence on the excitation wavelength was determined by the original method.

It was found that chromium ions in air-synthesized yttrium-alumoborate glass form the overwhelming proportion of optical centers of three- and four-coordinated Cr^{3+} , as well as the impurities of Cr^{4+} , Cr^{5+} , and Cr^{6+} centers. Barbotage of the melt of these glasses with oxygen or introduction of alkali metals is accompanied by a significant increase in the Cr^{6+} fraction. The influence of heavy alkali metals on the degree of oxidation of chromium is much weaker than that of light metals. The luminescence of Cr^{3+} ions in the synthesized glasses is due to the centers with both strong and weak ligand fields. Initial formation of Cr^{3+} centers occurs predominantly in matrix submicroregions enriched with alkali metals, yttrium or ytterbium. The quantum yield of luminescence of Cr^{3+} ions and their sensitized luminescence of Yb^{3+} ions strongly depend on the excitation wavelength (see fig. 1), which is caused by the influence of the internal filter, whose role is played by Cr^{4+} , Cr^{5+} and Cr^{6+} ions.

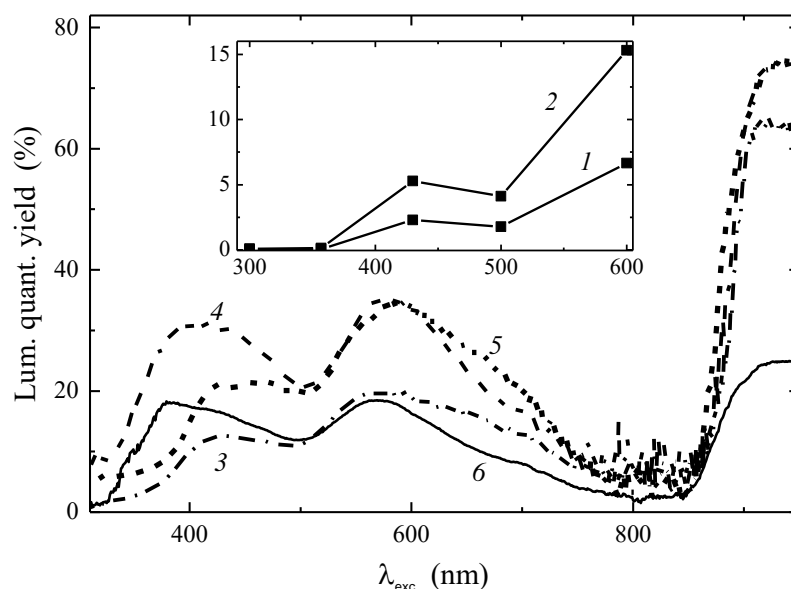


Fig. 1. Dependence of luminescence quantum yield of Cr- (inset) and Cr–Yb-containing glasses of the system (mole %) $60\text{B}_2\text{O}_3\text{--}30\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}10(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{O}_3 + (\text{mass } \%) y\text{Cr}_2\text{O}_3 + z\text{M}_2\text{O}$ on excitation wavelength. x : 0(1), 0.5(2,3), 1.0(4,5), 2.0(6); y : 0.007(1), 0.014(2), 0.05(4,5), 0.02(3); z : 5.0(3), 8.0(5). $\text{M} = \text{Na}$. The melt of glasses 2 and 4 were barbotaged with oxygen.

Cr^{4+} ions which absorb in the broad electro-dipole ${}^3A_2 \rightarrow {}^3T_1$ band with $\lambda_{\text{max}} \approx 620$ nm and the weak magnetodipole ${}^3A_2 \rightarrow {}^3T_2$ band near $1 \mu\text{m}$ [6] do not luminesce in these glasses, while Cr^{5+} ions exhibit weak wideband luminescence in the red region of the spectrum, which is presumably due to $[\text{CrO}_6]^{7-}$ polyhedra. Excitation transfer from Cr^{3+} ions to Yb^{3+} ones occurs mainly by the dipole-dipole mechanism from centers with a weak ligand field from both the 4T_2 and 2E states. The maximum peak value of the quantum yield of sensitized luminescence of Cr–Yb-containing glasses is 35 % and is achieved for alkaline and «barbotized» glasses with small concentration of chromium and ytterbium (see fig. 1, curves 4 and 5 at $\lambda_{\text{exc}} \approx 580$ nm). Obviously, the elimination of the Cr^{4+} impurity and the Cr^{5+} tetrahedral centers which absorb in broad bands at

$\lambda_{\max} \sim 670$ nm and 1100 nm [7] will lead to a significant increase in the luminescence quantum yield and leveling out the dip in its spectrum at $\lambda \approx 800$ nm. At high concentrations of Yb^{3+} (≥ 2 mol. % Yb_2O_3), a weakly effective transfer of excitations to the latter from the charge transfer state of $[\text{CrO}_4]^{2-}$ oxocomplexes is possible, as indicated by the appearance of a small «hump» at $\lambda \approx 380$ nm (see fig. 1, curve 6).

Thus, the investigated coactivated glasses, taking into account their small light scattering with minimization of the impurity of highly charged chromium ions, can represent a real alternative to the developed luminescent concentrators of solar radiation based on Cr–Yb-containing glass ceramics. They may also prove to be an optimal downshifting converter of solar radiation into the «working» absorption band of potential laser glass-ceramics with Ni^{2+} ions [8].

This work was supported in part by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no.), by the Ministry of Science and Higher Education of Russia (grant no FSSM-2020-0003), and with equipment from the D.I. Mendeleev Center for Collective Use (grant № 13.CKP.21.0009 of the Ministry of Science and Higher Education of Russia).

1. I.B. Artsybysheva et al., *Physics and chemistry of glass* **16**, 625 (1990) (in Russian).
2. W. Fu et al., *Ceramics International* **46**, 15054 (2020).
3. G.E. Malashkevich et al., *Mat. Chem. Phys.* **137**, 48 (2012).
4. G.E. Malashkevich et al., *Opt. Mater.* **76**, 253 (2018).
5. G.E. Malashkevich et al., *Optics and spectroscopy* **130**, 199 (2022) (in Russ.).
6. X. Feng, S. Tanabe, *Opt. Mat.* **20**, 63 (2002).
7. P. Gerner, K. Kramer, H.U. Gudel, *J. Lumin.* **102–103**, 112 (2003).
8. A.S. Grabtchikov et al., *Opt. Commun.* **491**, 126955 (2021).

NEW LUMINESCENT AND LASER MATERIALS BASED ON GLASSES IN THE SYSTEM $\text{PbCl}_2\text{-PbO-SiO}_2$

D.A. Butenkov, O.B. Petrova, K.I. Runina, A.M. Slastuhina

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

E-mail: dabutenkov@gmail.com

The pioneering works on oxochloride glasses and the subsequent growth of researchers interest in them occurred in the 1970s-1990s of the XX century [1]. These studies were mainly aimed at studying electrical conductivity in glasses and creation of solid electrolytes based on them [2]. However, there is no information about their optical and spectral properties in the scientific literature. The creation of new luminescent and laser materials based on these systems is promising, due to the low phonon energy of the halide matrix and, therefore, the possibility of obtaining effective radiation in the infrared region of the spectrum [3].

Glasses in the system $\text{PbCl}_2\text{-PbO-SiO}_2\text{-NdF}_3$ by the standard melt method were synthesized. PbCl_2 , PbO , SiO_2 , NdF_3 with purity 99.99 wt. % were used as initial reagents. We managed to obtain high-quality glasses with a nominal content of lead chloride up to 60 mol. %. The amorphous structure of the samples was confirmed by X-ray diffraction analysis (XRD). The glasses were studied by optical spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC). Glass-ceramics (GCs) was obtained by controlled crystallization of glasses under various temperature and time condition.

The luminescence of GCs and the initial glasses was taken with laser excitation at a wavelength of 785 nm. This oxochloride system exhibits luminescence typical of Nd^{3+} ions at transitions from the excited state $^4\text{F}_{3/2}$ to states $^4\text{I}_{9/2}$ (880 nm), $^4\text{I}_{11/2}$ (1060 nm) and $^4\text{I}_{13/2}$ (1325 nm). Luminescence spectra of GC undergo significant changes compared to the spectra of the initial glasses. XRD results showed the formation of chloride crystalline phases, including PbCl_2 . Changes in the luminescence spectra are associated primarily with the entry of Nd^{3+} ions into the formed crystallites.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the FSSM-2020-0005 project.

1. P.C. Schultz, M.S. Mizzoni, J. Am. Ceram. **56(2)**, 65 (1973).
2. I.A. Sokolov et al., Glass Physics and Chemistry **26(2)**, 148 (2000).
3. D.A. Butenkov, K.I.Runina, O.B.Petrova, Glass and Ceramics **78**, 135 (2021).

PRODUCTION OF AMORPHOUS SILICON DIOXIDE
ENRICHED WITH ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si

A.D. Bulanov, K.F. Ignatova, M.E. Komshina, O.Yu. Troshin
*Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,
Nizhny Novgorod, Russia*
E-mail: ignatova@ihps-nnov.ru

Obtaining and studying the properties of isotopically modified materials is a promising direction for various fields of science and technology [1, 2]. In particular, it is indicated that it is possible to manufacture optical fibers with a modified isotopic composition based on silicon dioxide, having a wider transparency window and lower optical losses. However, information about obtaining and studying the properties of real samples is very limited.

When working with scarce and expensive isotopically enriched substances, it is necessary to operate with small amounts of substances, which can provide the sol-gel method, which is one of the promising ways to obtain monolithic samples of silicon dioxide. To obtain $^{28}\text{SiO}_2$ by the sol-gel method, the reaction of $^{28}\text{SiCl}_4$ with dried ethyl alcohol and hydrolysis of the formed $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ with an aqueous alcohol solution in the molar ratio $^{28}\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:4:4$ was carried out. Next, the solution was kept until a xerogel was formed, which was then calcined. To study the gelation process, a study was conducted on the selection of a catalyst (HCl , HNO_3 , HF) and the temperature regime of drying. The kinetics of the sol particle size growth was studied and the densities of the resulting images were determined. As part of this work, samples of amorphous SiO_2 were obtained from a simple substance $^{\text{nat}}\text{Si}$, ^{28}Si , ^{29}Si and ^{30}Si by dissolving silicon in a mixture of nitric and hydrofluoric acids followed by precipitation of silicon dioxide with ammonia. The precipitate was centrifuged and washed with distilled water. The obtained silica precipitates of various isotopic compositions were dried and calcined at $800\text{ }^\circ\text{C}$.

The spectra of silicon dioxide images of various isotopic compositions were obtained and characterized by IR spectroscopy. For $^{\text{nat}}\text{SiO}_2$, $^{29}\text{SiO}_2$, and $^{30}\text{SiO}_2$, there is a shift of absorption bands by an amount of $8.6\text{-}24.3\text{ cm}^{-1}$ to the low-frequency region with respect to silicon dioxide-28. The magnitude of the shift differs significantly from the theoretical value calculated from the ratio of the reduced masses. The impurity and isotopic composition of the samples was determined by the MS-ISP method. According to the X-ray phase analysis data, the samples are amorphous and do not contain crystalline inclusions.

1. V.G. Plekhanov, *Successes of physical sciences* **108(11)**, 1245 (2000).
2. D.C. Allan, J.T. Brown, Patent USA № 0022562 (03.02.2005).

CORRECTION OF X-RAY DIFFRACTION DATA FOR AN INHOMOGENEOUSLY ABSORBING SPHERICAL SAMPLE

M.V. Kudryashov, N.V. Somov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

E-mail: m.v.kudryashov@phys.unn.ru, somov@phys.unn.ru

The currently most used methods for taking into account the absorption of X-ray radiation proceed from the fact that the linear absorption coefficient μ is constant throughout the entire volume of the sample. However, μ may differ in different parts of a real crystal, due to defects, inhomogeneous incorporation of impurity and doping elements, etc. Inhomogeneous incorporation of impurities is often observed in solid solution crystals, which are widely used, for example, in optics as laser, nonlinear optical materials; in micro-, nano- and optoelectronics. So, X-ray diffraction analysis (XRD) of such materials can be complicated by incorrectly taking into account the inhomogeneous absorption of the sample under study.

In this work, we analyze the effect of inhomogeneous absorption on X-ray diffraction data and propose a method for taking into account the absorption of X-ray radiation by an inhomogeneous crystalline sample. A numerical method for calculating absorption corrections for reflection intensities obtained from a spherical sample with inhomogeneous absorption is proposed. The method is based on dividing the volume of the sample with a regular grid, the directions of which coincide with the directions of the incident and reflected beams. Each node of the grid is the center of normal reflection, and the value of μ in an elementary volume centered at the node is determined by the function of coordinates. The absorption factor is calculated as the sum of the losses during incidence and reflection from each node m of a regular grid in the bulk of the crystal.

The proposed method was tested on model crystalline spherical samples characterized by different laws of change of the absorption coefficient in the volume of the sample. It is found that the inhomogeneous distribution of the absorbing power significantly affects the intensity of X-ray radiation recorded by the detector during XRD, and the attenuation coefficient of the diffracted beam depends significantly on the direction of the absorption coefficient gradient.

A method for searching for an absorption model in a spherical sample is proposed. Also, a method for correcting the experimental array of diffraction data which taking into account the inhomogeneous absorption of the sample is proposed.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state task № 0729-2020-0058.

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF ZrO_2 - Sc_2O_3 - $Tb_2O_{3.5}$ CRYSTALS

N.A. Larina¹, E.E. Lomonova², P.A. Ryabochkina¹, N.Yu. Tabachkova^{2,3}

¹*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

³*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

E-mail: saharova.1996@mail.ru

The development of oxygen-conducting membranes for solid oxide fuel cells (SOFCs) based on stabilized zirconia crystals is currently a promising direction. ZrO_2 - Sc_2O_3 solid solutions have high ionic conductivity compared to other materials based on zirconia. Therefore, they are of considerable interest as a solid electrolyte material [1].

ZrO_2 - Sc_2O_3 compounds are complex materials in terms of their phase composition and the presence of phase transitions. Therefore, to obtain stable cubic solid solutions, additional dopants of yttrium oxides or rare earth elements are used [2-4].

The aim of this work is to evaluate the effect of heat treatment on the phase composition, structure, and spectral-luminescent properties of $ZrO_2 - x$ mol. % Sc_2O_3 ($x = 8, 9$ and 10) solid solutions additionally doped with terbium oxide with a concentration of 1 to 2 mol. %.

Single crystals of solid solutions, which were obtained by the method of directional crystallization of the melt using direct high-frequency heating in a «cold» container, were used as samples for research. Heat treatment was carried out in oxidizing ($T = 1000$ °C, $t = 400$ h) and reducing media ($T = 1600$ °C, $t = 4$ h). The phase composition of the crystals was studied by Raman spectroscopy and X-ray diffractometry. The spectral-luminescent characteristics of the crystals were studied by optical spectroscopy.

1. S.P.S. Badwal et al., *Solid State Ionics* **136-137**, 91 (2000).
2. M.A. Borik et al., *J. Alloys Compd.* **844**, 156040 (2020).
3. M.A. Borik et al., *Opt. Spectrosc.* **125**, 898 (2018).
4. S. Omar et al., *J. Am. Ceram. Soc.* **95**, 1965 (2012).

INVESTIGATION OF THE PHOTOCHROMIC EFFECT IN $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ GERMANATE BY OPTICAL SPECTROSCOPY

K.N. Boldyrev, A.D. Molchanova

Institute of Spectroscopy of RAS, Troitsk, Russia

E-mail: nastyamolchanova@list.ru

Bismuth germanate $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) crystals possess unique physical properties (photoconductivity, electro-optical properties) that make them promising optical materials. Of greatest interest is the photochromic effect in this compound and the study of its nature [1, 2]. Due to the photosensitivity and fast response time of this crystal, it can be used as a highly sensitive read/write material for phase volume holography.

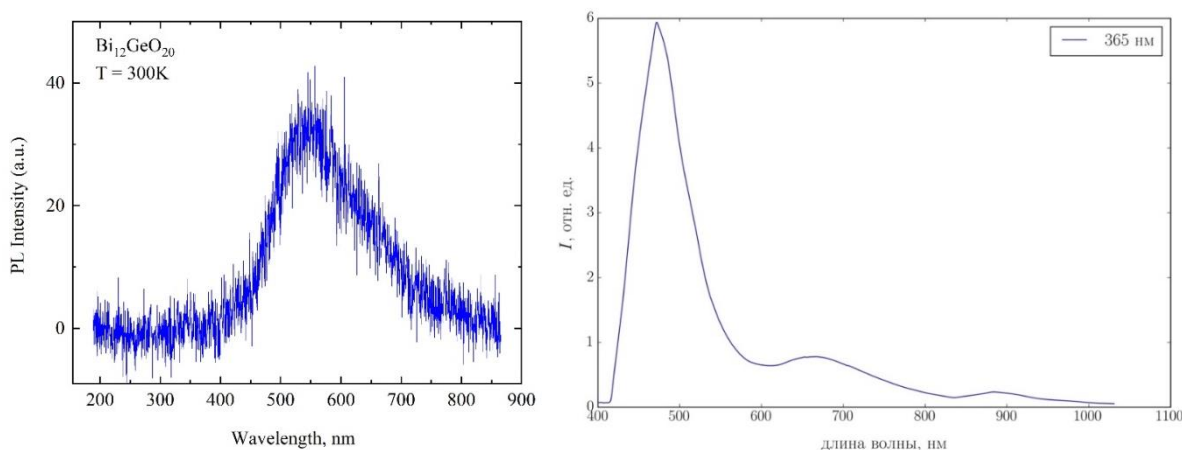


Fig. 1. X-ray luminescence spectrum at room temperature (left) and luminescence spectrum at $T = 10\text{ K}$ (right, $\lambda_{\text{ext}} = 365\text{ nm}$) of BGO.

In this work, we have carried out a complex optical investigation of a high-quality $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single crystal grown by the Bridgman method (vertical version). We registered absorption spectra (both without irradiation and under illumination with lasers of various wavelengths and X-rays), luminescence spectra in a wide range of frequencies ($10 - 25000\text{ cm}^{-1}$) and temperatures ($5 - 300\text{ K}$). In addition, the X-ray luminescence spectrum of a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single crystal was recorded for the first time.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant № 21-72-00134.

1. O.A. Gudaev et al., *N Avtometriya* **5**, 38 (1981).
2. V.M. Skorikov et al., *Inorg. Mater.* **38**, 172 (2002).

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE LUMINESCENT CHARACTERISTICS OF HYBRID MATERIALS UNDER THE CLIMATIC CONDITIONS OF SOUTH-EAST ASIA

R.I. Avetisov¹, O.B. Petrova¹, L.V. Popkova¹, K.I. Runina¹, A.U. Sekacheva¹,
Dinh Trung Do², Thu Trang Ta², Van Luong Nguyen³

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

²*Institute of Tropical Durability, Vietnam-Russia Tropical Centre, Hanoi, Vietnam*

³*Vietnam-Russia Tropical Centre, Hanoi, Vietnam*

E-mail: runinakristina@mail.ru

One of the possible applications of luminescent films based on hybrid materials (HM) is the marking of goods and valuables (for example, cultural property) to provide protection against counterfeiting. The technique of capillary film deposition provides fast, simple and efficient production of thin films with the maximum possible use of the luminescent substance. We used films based on HM obtained by solid-phase synthesis from CaF₂ and lithium 8-hydroxyhonolate (Liq) by heat-treated at 200 °C. The HM powder was dispersed in isopropanol under the influence of ultrasound, poured into a capillary felt-tip pen, and applied to surfaces with different roughness and chemical nature (aluminum foil, wood, Al₂O₃ ceramics, plastic, and paper) [1]. The films exhibit an intense broad luminescence band in the region of 400-700 nm, characteristic of HM based on 8-hydroxyquinolates. To protect the films from mechanical damage, the HM films were coated with a thin layer of cyanoacrylate glue [2]. Sample palettes were exhibited at the Vietnam - Russia Tropical Centre in Hanoi and Nha Trang from March 2021 to February 2022 under various environmental conditions: on grass and mycological sites, in a ventilated louvered warehouse (6 sites).

The hybrid films showed a high stability of the luminescence spectrum profile. The intensity depended on the site and substrate material, the greatest decrease in intensity was observed in open areas and on plastic.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the FSSM-2020-0005 project.

1. K.I. Runina et al., Proceedings of the XXVII International Scientific Conference Optics and Spectroscopy of Condensed Matter, Krasnodar, 179 (2021).
2. M. Zykova et al., Applied Physics A. **128(3)**, 240 (2022).

INVESTIGATION OF THE RADIATION RESISTANCE OF CRYSTALS AND CERAMICS BASED ON SILVER AND THALLIUM HALIDES

V.M. Kondrashin, A.S. Korsakov, A.E. Lvov, P.V. Pestereva, D.D. Salimgareev,
I.V. Yuzhakov, A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia*

E-mail: v.m.kondrashin@urfu.ru

In connection with the active development of technologies that require the introduction of modern materials, active work is underway to search for and develop the element base of optics and photonics. Before the introduction of new materials in technologies and devices, a comprehensive study of their properties is required. One of the most important tasks is to study the radiation resistance of optical materials [1].

In this work, polycrystalline plates obtained by hot embossing from high-purity crystals and optical ceramics of the $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ – AgI and $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ – AgI systems were studied. These materials were synthesized for the first time in the scientific laboratory «Fiber Technologies and Photonics».

The irradiation procedure was preceded by the determination of the transmission spectra of the initial samples. In the course of preliminary preparation, the materials transmission spectrum was measured on an IR-Fourier spectrometer IRPrestige-21 (Shimadzu).

During the experiments, the samples were irradiated with electron radiation at doses up to 1 MGy. At each stage, the materials were exposed to radiation with a dose of 200 kGy, after which the transmission spectra of the samples were measured. Irradiation was carried out at the Innovation and Implementation Center «Radiation Sterilization» of the Ural Federal University on a new linear electron accelerator UELR-10-10C with energy of up to 10 MeV.

In the course of the measurements, it was found that the parameters of the transmission spectrum of crystals irradiated with a dose of 1 MGy remained at the same level or differed negligibly little compared to the original samples. The values obtained in the course of the experiment allow us to conclude that crystals and ceramics based on silver and thallium halides have a high radiation resistance and that these materials have great potential for use in high-tech industries.

This work was supported by the Russian Science Foundation (№ 21-73-10108).

1. E. Korsakova et al., *Infrared Physics and Technology* **93**, 171 (2018).

OPTICAL CRYSTALLINE MATERIALS OF THE SYSTEM
AgCl – AgBr – AgI FOR MEDICINE

S.E. Barykina, D.A. Belousov, A.S. Korsakov, A.E. Lvov, D.D. Salimgareev,
A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

E-mail: d.d.salimgareev@urfu.ru

At present, the development of the material optical base is an urgent task. There are a limited number of materials with high spectral transmittance, non-cleavage, non-hygroscopic, flexible and non-toxic, as well as photo- and radiation resistance. The simultaneous presence of all the above optical materials properties allows them to be used in the medicine.

The most attractive materials that satisfy all of the above properties are crystals and optical ceramics based on silver halides of the AgCl – AgBr – AgI system. Doping existing the AgCl – AgBr crystals system with silver iodide makes it possible to increase the spectral transmission to the far infrared range, expand the transmission in the terahertz frequency range, and significantly increase the photo- and radiation resistance of the resulting materials [1, 2].

In view of this, a team of authors studied the phase diagrams belonging to the polythermal section AgCl – AgBr – AgI of the concentration tetrahedron Ag – Cl – Br – I.

As a result, the regions of existence of stable solid solutions were established, where it is possible to grow single crystals, and the regions of existence of two crystalline phases, where it is possible to synthesize optical ceramics, were found. According to the results obtained, modes were selected and a single crystal of composition 5 wt. % silver iodide in AgCl_{0.25}Br_{0.75} solid solution. This crystal has a spectral transmission range from 0.4 to 45.0 μm without absorption windows with a maximum transparency of up to 75 %. The results obtained are the basis for further fabrication of infrared fibers, optical plates and lenses by extrusion, which can be successfully used in medical devices for various purposes.

The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, State Contract no. FEUZ-2020-0058 (H687.42B.223/20).

1. L. Zhukova et al., *Opt. Mat.* **113**, 110870 (2021).
2. D. Salimgareev et al., *Opt. Mat.* **125**, 112124 (2022).

SYNTHESIS OF OPTICAL CERAMICS $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54} - \text{AgI}$
AND $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26} - \text{AgI}$ SYSTEMS

A.S. Korsakov, A.E. Lvov, D.D. Salimgareev, A.A. Schukina, D.V. Shatunova,
A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia*

E-mail: d.d.salimgareev@urfu.ru

The development of new optical materials that are transparent from the visible to the far infrared (0.4 - 60.0 μm), as well as in the terahertz range (0.05 - 30 THz or 6000.0 - 10.0 μm) is an urgent task of modern science. The most promising materials, which transparent in these ranges, are crystals and optical ceramics based on silver and monovalent thallium halides. In view of this, studies were carried out to develop new optical ceramic materials based on the $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54} - \text{AgI}$ and $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26} - \text{AgI}$ solid solutions systems. For both systems, studies of their phase diagrams were carried out and regions were established where it is possible to synthesize both single crystals and optical ceramics [1].

Synthesis of optical ceramics was carried out using the method of thermozone crystallization-synthesis (TZKS) and the method of directional crystallization. At the first stage, using the TZKS method, the initial raw materials compositions were synthesized with the content of silver iodide in the $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ in the amount of 6, 13, 19, and 25 mol. %, and with the content of AgI in $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ 7, 14, 20 and 27 mol. %. Further, optical ceramics were synthesized from all compositions on the Bridgman Furnace and polycrystalline plates were fabricated by hot embossing [2]. The spectral characteristics of the samples were studied on these plates. It has been established that the optical ceramics of the $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54} - \text{AgI}$ system transmits from 0.5 to 60.0 μm without absorption windows with a maximum transparency of 70 %. Ceramics of the $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26} - \text{AgI}$ system is transparent from 0.5 to 50.0 μm with a similar maximum transparency.

Thus, the developed new optical ceramic materials are promising optics for the mid- and far-IR ranges. It should be noted that the study of the terahertz transmission of these materials is the subject of further research.

This work was supported by the Russian Science Foundation (№ 21-73-10108).

1. D. Salimgareev et al., Opt. Mat. **149**, 107825 (2022).
2. D. Salimgareev et al., Opt. Mat. **125**, 112124 (2022).

PHASE TRANSITIONS IN GRAPHITE AND GRAPHENE AT COLD COMPRESSION

T.K. Petrosyan, G.V. Sukhanova, A.V. Tebenkov, G.V. Tikhomirova
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia
E-mail: galina.tikhomirova@urfu.ru

Previously, we investigated commercial high purity graphite [1]. Features have been found in the pressure dependence of resistance as well as in its relaxation times in the pressure range of 27-35 GPa. These features were referred to a new phase nucleation. The SEM image of the sample subjected to the pressure of 45 GPa shows the inclusion of a new phase, which did not disappear after removal of the load. It has been found also that the new phase nucleation requires a long time of exposure under pressure.

In this study, two additional different initial graphite materials were used: highly oriented pyrolytic graphite and natural graphite powder (from Krasnoyarsk Territory). The samples were of ~ 0.2 mm diameter and of thickness from 10 to 30 μm . The pressure was applied by means of a diamond anvil cell with electrically conductive anvils made of synthetic carbonado-type polycrystalline diamond. The resistance measurements were carried out at room temperature in a course of forward and backward pressure sweep in the pressure range from 16 GPa to 50 GPa. The voltage applied to the samples corresponded to the linear part of current-voltage characteristics. Time dependences of the resistance after changing the pressure were also measured.

The pressure dependences of resistances of highly oriented pyrolytic graphite and natural graphite were found to be different. The resistance of oriented pyrolytic graphite increased irreversibly after long exposure under high pressure, while the resistance of the natural graphite did not change. These data give evidence for the formation of high resistivity carbon phase.

The reason for the different behavior of oriented and natural graphite can be the different original structure of these materials [2]. If some kind of layered planar structure of pyrolytic graphite is conserved at high pressures used, the stress is applied across the graphite planes. In the case of the natural graphite, the graphite planes orientation as well as stress direction is arbitrary.

1. T.K. Petrosyan, G.V. Tikhomirova, D.K. Kuznetsov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **653**, 012096 (2015).
2. Y. Wang, K.K.M. Lee, *Journal of Superhard Materials* **34**, 360 (2012).

COMPARATIVE STUDY OF ZIRCONIUM DIOXIDE CRYSTALS PARTIALLY STABILIZED BY OXIDES OF RARE EARTH ELEMENTS

M.A. Borik¹, A.S. Chislov^{1,2}, A.V. Kulebyakin¹, E.E. Lomonova¹,
F.O. Milovich², V.A. Myzina¹, N.Yu. Tabachkova^{1,2}

¹*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

²*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

E-mail: chislov.artem@bk.ru

Materials based on partially stabilized zirconium dioxide (PSZ) occupy a prominent place among structural non-metallic materials. These materials have a high value of hardness and crack resistance, refractoriness, the ability to work in aggressive environments, PSZ can be used in a variety of fields of science and technology. Oxides of alkaline earth or rare earth elements can be used to stabilize zirconium dioxide, however, materials stabilized with yttrium oxide are the most studied. At the same time, materials stabilized with gadolinium oxide materials can be used as a heat-protective coating, are of great interest because they have low thermal conductivity.

The purpose of this work was to perform a comparative analysis of the structural features and mechanical properties of PSZ crystals stabilized with gadolinium and yttrium oxides.

PSZ crystals were grown by the method of directed crystallization of the melt in a cold crucible. Two series of crystals stabilized with yttrium oxide or gadolinium oxide in comparable concentrations from 2.0 to 4.0 mol.% were grown. The results of the study of the phase composition, crystal structure, microhardness and fracture toughness of the obtained crystals are presented.

The study of the phase composition showed that all crystals contain two tetragonal phases with varying degrees of tetragonality. The content of Y₂O₃ and Gd₂O₃ in these phases was evaluated. The influence of differences in the phase composition of crystals on the mechanisms of transformational hardening is discussed. It is shown that the efficiency of transformational hardening requires the preservation of the maximum amount of tetragonal phase and the optimal transformational ability of this phase. The magnitude of fracture toughness largely depends on the microstructure and phase composition of the material. In turn, the crystal structure strongly depends on the concentration and type of stabilizing oxide.

The work is supported by RSF (project No. 22-29-01220).

LUMINESCENCE OF BISMUTH GERMANATE GLASS ACTIVATED BY Er^{3+} AND $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ PAIR

L.M. Savenko, I.V. Stepanova, Yu.V. Zhegucheva

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

E-mail: stepanova.i.v@muctr.ru

Increased attention of scientists is focused on materials that luminesce in the telecommunications range, which include bismuth germanate glasses. Modification with rare earth oxides makes it possible to expand the spectral range of such glasses [1]. The current work is devoted to the study of the luminescent properties of bismuth germanate glasses doped with Er^{3+} and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$.

Glasses of 4 compositions were synthesized: $10\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}90\text{GeO}_2\text{-}0.1\text{Er}_2\text{O}_3$ (without Yb_2O_3) and $10\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}90\text{GeO}_2\text{-}x\text{Er}_2\text{O}_3\text{-}y\text{Yb}_2\text{O}_3$ where $x = 0.01; 0.05; 0.1$ mol. % and $y = 0.05; 0.1; 0.2$ mol. %. Er_2O_3 and Yb_2O_3 were introduced into the glass in excess of 100 %. The initial oxides after sintering with intermediate grinding were melted at a temperature of 1100 °C for 30 minutes in air and cast onto a metal substrate. Photoluminescence was recorded on an NIR Quest 512 spectrometer (Ocean Optics) in the range of 890-1740 nm, with a step of 1.67 nm at a temperature of 300 K ($\lambda_{\text{ex}} = 377$ nm).

In the luminescence spectra of co-doped samples, two characteristic spectral ranges can be distinguished: 930-1080 nm (Er^{3+} , Yb^{3+}) and 1450-1680 nm (Er^{3+}). The luminescence intensity for different ranges varies depending on the total amount of rare earth ions and their ratio. The most intense luminescence was observed for the $10\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}90\text{GeO}_2\text{-}0.1\text{Er}_2\text{O}_3\text{-}0.2\text{Yb}_2\text{O}_3$ sample. A comparison of the luminescence contour of this glass with a sample doped only with Er_2O_3 showed that the addition of Yb_2O_3 leads to a broadening of the luminescence range: 930-1080 nm ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$) instead of 955-1030 nm (Er^{3+}). The boundaries of the second range of the compared samples remain unchanged (1450-1680 nm), however, for the co-doped sample ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$), a pronounced splitting of the peak at 1535 nm is observed.

Thus, co-doping with the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ ion pair makes it possible to expand the luminescence spectral range of bismuth germanate glasses.

1. Y. Luo et al., *Front. Optoelectron.* **11(1)**, 37 (2018).

X-RAY AS A METHOD FOR CONTROLLING THE CHARGE STATES OF COLOR CENTERS IN DIAMONDS

K.N. Boldyrev^{1,2}, V.S. Sedov³, E.S. Sektarov^{1,2}

¹*Institute of Spectroscopy of RAS, Troitsk, Russia*

²*National Research University «Higher School of Economics», Moscow, Russia*

³*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: sektarov_es@mail.ru

Color centers in diamond are widely used in various fields of science and can be applied in optical quantum memory, quantum sensorics, lasers and quantum cryptography. The purpose of this work is to illustrate that X-Ray can influence on color centers.

In this work, we studied the CVD-grown single-crystal diamond, which contained of both NV and SiV-centers. For the study, we use a self-made spectroscopic setup based on a high-resolution Fourier spectrometer Bruker IFS 125 HR. X-rays were obtained using a compact X-ray tube BSV-30 with a copper anode. The rated electrical power of the X-ray tube was 400 W, the radiation energy was 8.027 keV (Cu K α).

The spectra obtained after exposure of X-rays, the absorption line intensities change at wavelengths of 946 nm (SiV⁰), 737 nm (SiV⁻), 575 nm (NV⁰), 637 nm (NV⁻) corresponding to color centers. Figure 1 illustrates the changes of absorption lines of SiV⁻ (737 nm) (Fig. 1(a)), SiV⁰ (946 nm) (Fig 1(b)) after X-ray exposure. It is clear to see that SiV⁻ decreases while SiV⁰ rises. Furthermore, more complex interaction is observed between NV⁰ and NV⁻. Changes in defect concentrations were calculated for samples NV and SiV by using calibration coefficients.

In this work, we demonstrated that X-Rays could affect the color centers. Data revealed the changes in absorption lines NV⁰ (575nm), NV⁻ (637nm), SiV⁻ (737 nm) and SiV⁰ (946 nm). We show that X-Ray can be used as the instrument for controlling charge state of color centers.

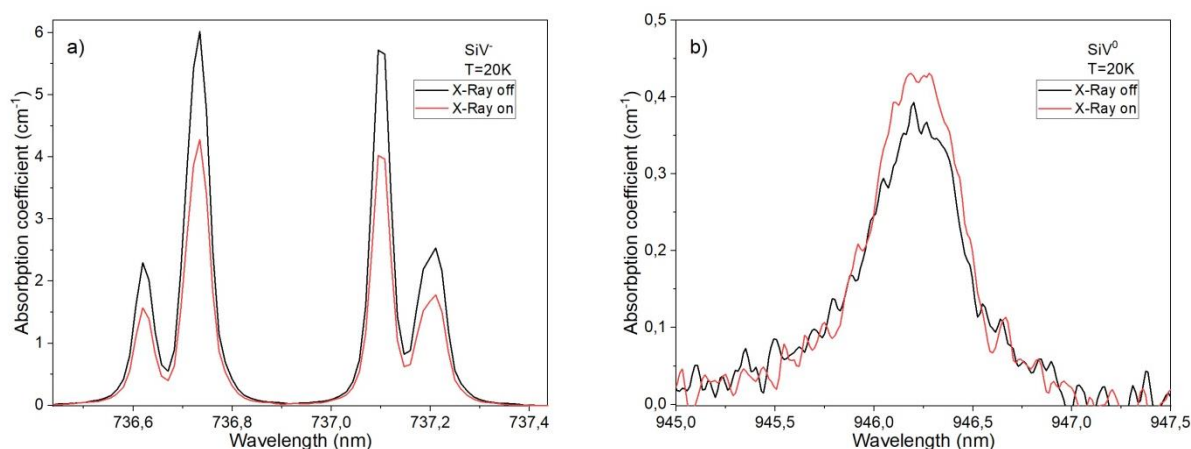


Fig. 1. Comparing of SiV-centers absorption spectra before and after X-Ray.

This work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 19-72-10132.

ANALYSIS OF THE IMPURITY COMPOSITION OF $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ CERAMICS BY PHOTOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY

N.A. Larina¹, E.E. Lomonova², P.A. Ryabochkina¹, E.I. Chernov³

¹*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

³*Research and Production Enterprise JSC «ECON», Obninsk, Russia*

E-mail: saharova.1996@mail.ru

Ceramic materials based on zirconia have a wide range of applications in many fields of science and technology [1, 2]. For example, the high oxygen-ion conductivity of these materials at elevated temperatures makes them suitable for use as electrolytic membranes in solid oxide fuel cells (SOFCs), oxygen sensors in gaseous media [2-4].

It is known that the electrical conductivity and thermomechanical properties of ceramic solid electrolytes depend on the technology of their manufacture, characteristics and methods of synthesis of the initial powders. Differences in the structure of the material and the content of impurities in it may be related to this.

In this work, the impurity composition of $(\text{ZrO}_2)_{0.909}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.09}(\text{Eu}_2\text{O}_3)_{0.001}$ ceramics was studied by photoluminescence spectroscopy. They were obtained from ground fused crystal samples of a similar composition by uniaxial pressing and slip casting. The presence of an uncontrolled impurity in the form of a $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ solid solution was revealed in the compacts. Photoluminescence spectroscopy and confocal microscopy revealed that this impurity is localized on the ceramic surface in the form of individual inclusions.

Using the methods of X-ray diffraction and Raman spectroscopy, the phase composition of ceramics was also studied. The results of X-ray phase analysis indicate that the compacts prepared by various methods are single-phase and consist of cubic ZrO_2 with close values of the crystal lattice parameters. Foreign phases were not detected. The studied ceramics are characterized by a structure close to the structure of fluorite (t'' phase) according to the results of Raman spectroscopy.

The local structure of ceramics was studied by photoluminescence spectroscopy using Eu^{3+} ions as a spectroscopic probe. It was found that the local crystalline environment of Eu^{3+} ions in $(\text{ZrO}_2)_{0.909}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0.09}(\text{Eu}_2\text{O}_3)_{0.001}$ ceramics, formed with the participation of oxygen vacancies, is identical to the local environment of Eu^{3+} ions in crystals of the same composition.

1. U. Peuchert et al., *J. Eur. Ceram. Soc.* **29**, 283 (2009).
2. N. Mahato et al., *Prog. Mater. Sci.* **72**, 141 (2015).
3. Y. Mansilla et al., *Mater. Today: Proc.* **14**, 92 (2019).
4. J.W. Fergus, *J. Power Sources* **162**, 30 (2006).

LEAD FLUOROBORATE GLASSCERAMIC CO-DOPED Er³⁺ AND Lu³⁺

A.V. Bakaeva, D.A. Butenkov, O.B. Petrova, K.I. Runina

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

E-mail: dabutenkov@gmail.com

Oxofluoride glassceramics (GCs) combine the best properties of crystalline fluorides and oxide glass, which makes them promising for doping with rare-earth (RE) ions and creating new laser materials [1]. The high efficiency of luminescence of oxofluoride GCs is due to the fact that RE activator is in fluoride environment with low phonon energy of crystal lattice, which suppresses non-radiative transitions. Heterovalent stabilization of the high-temperature cubic β -PbF₂ phase by trivalent rare-earth ions is possible, which are also introduced as activators in laser materials. The successful application of this approach for co-doped of Nd/La, Eu/Gd was shown in [1, 2], in the present study the crystallization and luminescence properties of Er/Lu co-doped GCs were studied.

Glasses were synthesized in a system of 66PbF₂–(34–x–y)B₂O₃–xErF₃–yLuF₃ (x = 0, 0.2, 1, 2, 3, 4; y = 0, 1, 2, 3, 3.8, 4). B₂O₃, PbF₂, ErF₃ and LuF₃ with a purity 99.99 wt. % were used as initial reagents. Glasses researched methods of optical spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC). A significant effect of the addition of rare-earth ions on the characteristic temperatures of glasses has been revealed. GCs was obtained by heat treatment initial glasses under various temperature and time conditions based on DSC data.

The luminescence of GCs and initial glasses was recorded upon excitation by a laser at a wavelength of 377 nm and 973 nm. In the IR region, with an increase in temperature and time of heat treatment, the intensity of emission at the $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of the Er³⁺ ion increases. The emission spectrum at the supersensitive transition $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (550 nm) undergoes strong changes depending on the chemical and phase composition. These results indicate a change in the environment of Er³⁺ ions due to their incorporation into different crystalline phases.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the FSSM-2020-0003 project.

1. O.B. Petrova et al., *J. Non-Cryst. Sol.* **531**, 119858 (2020).
2. D.A. Velichkina et al., *Glass and Ceramics* **78**, 14 (2021).

STUDY OF PHASE FORMATION IN A PbF_2 - EuF_3 QUASIBINARY SYSTEM

M.O. Anurova¹, M.N. Mayakova^{2,3}, O.B. Petrova², K.I. Runina², C.C. Zykova²

¹*«IRE-Polus» Ltd, Fryazino, Russia*

²*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

³*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: zykova-sc@mail.ru

Fluoride compounds and solid solutions in MF_2 - REF_3 (RE – rare earth) systems are gaining more attention due to their potential use as photonic materials and phosphors. A distinctive feature of these systems is the presence of a wide area of crystallization of the cubic phase – $Fm\bar{3}m$, type fluorite, which is more than 20 mol. % RE at 650 – 700 °C [1]. Along with this, many systems assume the presence of a rhombohedral ordered phase (R-phase), which exists in a narrow concentration range of about 40 mol. % RE. Due to their similarity, the problem of identifying the considered phase of «rhombohedral fluorite» arises [2].

The goal of this work is the synthesis and study of samples of the composition $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{F}_{2+x}$, with the introduction of EuF_3 at concentrations of 35-45 mol. %, at which the R-phase is supposed to be obtained. Samples were obtained by solid-phase synthesis at 550 °C in a fluorinating atmosphere and by co-precipitation from aqueous solutions of nitrates. $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, PbF_2 , EuF_3 , HF no worse than 99.99 wt. % were used as starting reagents. Based on the XRD results, the unit cell parameter was calculated. X-ray spectral microanalysis revealed deviations from the nominal compositions of the samples, which is no more than 0.05 at. % for Pb and Eu. In order to obtain a deeper understanding of the crystal structure of the synthesized samples, the Raman spectra were analyzed.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the FSSM-2020-0005 project.

1. A.K. Tyagi et al., J. Solid State Chem. **177**, 1746 (2004).
2. O.B. Petrova et al., J. Lumin. **238**, 118262 (2021).

PHASE TRANSFORMATIONS IN THE PRODUCTION OF GLASS CERAMICS BASED ON BaO–B₂O₃–Bi₂O₃ AND Er:YAG GLASS

K.V. Balueva, K.F. Ignatova, M.E. Komshina, A.M. Kutin, A.D. Plekhovich, E.E. Rostokina

*Devyatykh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of RAS,
Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: ignatova@ihps-nnov.ru

One of the key materials of quantum electronics and laser engineering are ceramics based on aluminotrium garnet doped with ions of rare earth elements (RE:YAG). The fundamental problem in this direction is the production of materials with zero porosity, high phase and chemical purity. An alternative approach to solving the existing problems is the development of glass-ceramic materials based on Er:YAG.

This work is devoted to the study of chemical and phase transformations, as well as the search for optimal heat treatment modes for the production of new glass ceramics based on Er:YAG and BaO–B₂O₃–Bi₂O₃ system glass selected using the SciGlass database based on a number of physico-chemical characteristics: T_g , ρ , refractive index n .

For the research, ceramics of the composition (Y_{0.5}Er_{0.5})₃Al₅O₁₂, which underwent high-temperature treatment at 1100 °C, and glass of the composition 20Bi₂O₃-65B₂O₃-15BaO were used.

A series of samples of glass ceramics BaO–B₂O₃–Bi₂O₃ – Er:YAG was obtained by hot impregnation in different temperature conditions from 700 to 1300 °C. The processes accompanying the formation of glass-ceramic material during heat treatment have been discovered and investigated by the DSC and RFA method. On the thermogram of the Er:YAG glass-garnet mixture at temperatures from 650 °C to 1020 °C, the formation of (Y,Er)BO₃ is observed, and at T = 1050 °C – the characteristic peak of the formation of the Er:YAG phase due to resynthesis from (Y,Er)BO₃ is observed. Heating above 1300 °C leads to a loss of mass due to evaporation of the glass components. Presumably, the decay of (Y,Er)BO₃ occurs, and the resulting B₂O₃ evaporates due to its low stability under these conditions.

The surface of the obtained samples was studied by scanning electron microscopy. Microphotographs show a significant increase in the size and number of pores with increasing temperature.

It is important to note that the resulting crystalline phase of YBO₃ is of interest as a matrix for phosphors, which opens up broad prospects for glass ceramics presented in this paper.

The work was carried out with the financial support of the RNF (project No. 20-73-10110).

LUMINESCENT PROPERTIES OF LANTHANUM-GADOLINIUM GERMANATE-BORATES CO-DOPED WITH Yb³⁺, Er³⁺ IONS

M.G. Komova¹, V.A. Krutko¹, K.V. Petrova¹, D.V. Pominova²

¹*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of RAS, Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: krutko@igic.ras.ru

Germanate borates Ln₁₄Ge₂B₆O₃₄ with structural formula Ln₁₄O₈(GeO₄)₂(BO₃)₆ – thermally stable compounds with mixed anions. They crystallize in the trigonal system (space group P3₁), which implies the presence of nonlinear optical, gyrotropic, and other functional properties [1]. These oxides are suitable for creating phosphors of various spectral ranges [2, 3].

In this work, a series of single-phase lanthanum gadolinium germanate borates (LGGBs) La₃Gd_{11-x-y}Ge₂B₆O₃₄: Yb_x, Er_y was synthesized by liquid-phase method (coprecipitation followed by annealing of intermediates). The spectral-luminescent properties of these materials have been studied. Upconversion luminescence spectra in synthesized LGGBs were recorded for the ²H_{11/2}, ⁴S_{3/2} → ⁴I_{15/2}, and ⁴F_{9/2} → ⁴I_{15/2} of Er³⁺ ions transitions under infrared (IR) laser excitation into the Yb³⁺ absorption band of (λ = 974 nm). The values of the energy yield (Ben, %) of the phosphors were determined and optimal ratios of Yb³⁺ and Er³⁺ concentrations were established to obtain the brightest phosphors (fig. 1 (a)). The concentrations of the active ions in the phosphors composition were controlled by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. The micromorphology of LGGBs phosphors was determined (fig. 1 (b)).

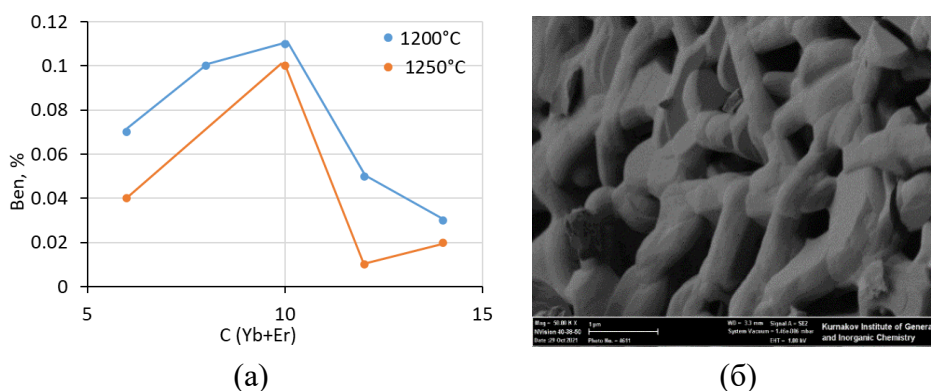


Fig. 1. (a) – dependence of Ben, % of synthesized LGGBs on the total dopants concentration; (b) – LGGBs micromorphology.

The work was performed using the equipment of the Center for Collective Use of the IGIC RAS with budget financing and support from the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - candidates of sciences (MK-3098.2022.1.2).

1. J.H. Zhang et al., *J. Solid State Chem.* **195**, 63 (2012).
2. V.A. Krutko et al., *Inorg. Mat.* **38**, 1364 (2002).
3. A. Ryabova et al., *Photonics & Lasers in Med.* **2**, 117 (2013).

ON COMMON AND «RARE» SPACE GROUPS OF PACKING STRUCTURAL UNITS IN CRYSTALS

E.V. Chuprunov, A.A. Pakuleva, N.V. Somov

*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russia*

E-mail: pakuleva1999@mail.ru

The subject of this study is the study of the properties of the most frequent in nature (widespread) and «rare» as well as «empty» according to the terminology of V.S. Urusov [1] space symmetry groups of crystals.

In the present work, we consider crystals whose atomic structure may be represented as a packing of separate structural units of a finite volume. This leads to geometrical constraints on the possible arrangement in crystal space of such structural units due to the fact that the distance between two atoms cannot be less than the sum of their crystallographic radius.

For each of the 230 space symmetry groups there are different restrictions on the arrangement of atoms in the crystal [2].

Symmetrical structural units can be arranged in crystal space along partial orbits of space groups. This requires that the structural unit be characterized by some nontrivial point group of its own symmetry.

This paper presents the results of calculations of forbidden volumes in crystal space for partial orbits of some space symmetry groups, the analysis of the ratio of structural units own symmetry and the comparison of the results of this analysis with the data contained in the international databases of structural data.

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia through the State assignment No 0729-2020-0058.

1. V.S. Urusov, T.N. Nadezhina, *Journal of Structural Chemistry* **50**, 26 (2009).
2. N.V. Somov, E.V. Chuprunov, *Crystallography*, 2020.

EFFECT OF SODIUM OXIDE ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF BISMUTH GERMANATE GLASSES

K.S. Serkina, I.V. Stepanova, A.A. Trofimova, D.V. Volkova
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
E-mail: stepanova.i.v@muctr.ru

Since the discovery of the unique luminescent properties of bismuth-doped germanates glasses, the study of these glasses properties has been an urgent scientific problem. Modification with alkali metal oxides makes it possible to lower the synthesis temperature and improve the optical quality of glasses [1]. The purpose of this work is to study the effect of sodium oxide on the properties of bismuth germanate glasses.

Synthesis of two series of glasses with different contents of alkali oxide $x\text{Bi}_2\text{O}_3 - (95-x)\text{GeO}_2 - 5\text{Na}_2\text{O}$ and $x\text{Bi}_2\text{O}_3 - (90-x)\text{GeO}_2 - 10\text{Na}_2\text{O}$, where $x = 1, 2, 3, 4, 5$ mol. %, was carried out. The doubly sintered mixture was held at $t = 1100$ °C for 30 minutes, then the melt was cast onto a steel substrate at room temperature. The density was measured by the hydrostatic method (MERCURY M-ER 123ACF balance), the refractive index was measured by the immersion method (MIN-8 microscope, Cargille Labs refractive index liquids) and the refractometer method (MEGEON 72022 refractometer).

The synthesized bismuth germanate glasses have a good optical quality; with an increase in the content of bismuth oxide, the appearance of a red color is noticeable for glasses of both series, indirectly indicating the presence of bismuth active centers [2].

The table 1 shows the values of density and refractive index for two glass series. As can be seen, with an increase in the content of bismuth oxide, there is a gradual increase in the density and refractive index.

Table 1. Physical properties of synthesized glasses

Content, mol. %	Density, g/cm ³ ±0.05					Refractive index n _D , ±0.01				
	Bi ₂ O ₃ →					Bi ₂ O ₃ →				
Na ₂ O↓	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5	4.08	4.09	4.13	4.21	4.34	1.67	1.68	1.70	1.72	1.73
10	4.09	4.09	4.15	4.37	4.40	1.67	1.70	1.72	1.73	1.74

Comparison of glasses with different contents of Na₂O shows that all physical characteristics have higher values for samples with 10 mol. % Na₂O. This phenomenon is associated with the «germanate anomaly» characteristic of the glasses of the system under study [1].

1. T.N. Ivanova, V.N. Bykov, Russian Metallurgy **8**, 678 (2010).
2. Y. Fujimoto, J. American Ceramic Society **93**, 581 (2010).

HIGH-PURITY TeO₂-ZnO GLASSES DOPED WITH RARE EARTH IONS

I.Ch. Avetissov, D.A. Butenkov, M.B. Grishechkin, T.S. Letyagin, K.I. Runina,
V.A. Solomatina

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

E-mail: viktoria20000000@mail.ru

Optical materials based on high-pure substances are in demand as functional in the manufacture of fiber-optic and optoelectronic devices in photonics, fiber, power, and nonlinear optics. A necessary condition for their application in these areas is high optical transparency and low optical losses. A new direction in the mid-IR range is the use of active fibers, which play the dual role of a nonlinear and amplifying medium [1]. TeO₂-ZnO glasses doped with rare earth ions are of great interest.

As part of the work, high-pure TeO₂-ZnO glasses of different compositions doped with rare earth ions were synthesized. For the synthesis of the charge we used high-pure ZnO 5N (67 impurities measured), obtained by precipitation from a nitric acid solution [2] followed by the annealing in oxygen atmosphere, and high-purity TeO₂ 5N (64 impurities measured), obtained by a gas transport reaction [3]. Synthesis was carried out in a platinum crucible in a muffle furnace under controlled oxygen flow. Er₂O₃, Yb₂O₃, Nd₂O₃ were used as doping agents.

The physical properties of the obtained glasses have been investigated, namely, microhardness, optical transmission, luminescence.

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation by the project FSSM-2020-005.

1. A.P. Savikin et al., *Inorganic Materials* **50**, 1261 (2014) (in Russian).
2. V.Solomatina et al., *Molodezh i nauka: shag k uspehu* **4**, 108(2021) (in Russ.).
3. E. Sukhanova et al., *Journal of Alloys and Compounds* **855**, 1 (2021).

LUMINESCENT HYBRID MATERIALS IN THE PbF₂-YF₃ SYSTEM
BASED ON LITHIUM 8-HYDROXYQUINOLATE OBTAINED
BY THE CO-PRECIPIATION METHOD

M.Yu. Andreeva¹, M.N. Mayakova^{1,2}, O.B. Petrova¹, P.V. Strekalov¹

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: strekalov_pavel@mail.ru

Luminescent organic-inorganic hybrid materials (HM) contain nanoclusters of highly efficient organic phosphor in a stable inorganic matrix. Based on PbF₂-containing matrices, HMs were synthesized by co-precipitation [1] using lithium 8-hydroxyquinolate (Liq) as an organic component. In the PbF₂-REF₃ (RE = rare earth) system, solid solutions of the cubic phase Pb_{1-x}RE_xF_{2+x} of the fluorite *Fm3m* type can form, the formation of a solid solution stabilizes the cubic phase.

Synthesis of HM in the system leads fluoride - yttrium fluoride - lithium 8-hydroxyquinolate was carried out by co-precipitation from aqueous solutions. At this stage, the effect of different co-precipitation conditions on the synthesis result was studied: the concentration of the initial components, the ratio of the components, and the order of supply of the reagents. As a result of co-precipitation, powder preparations were obtained containing both the low-temperature orthorhombic α -PbF₂ phase and solid solutions based on the cubic β -PbF₂ phase, depending on the RE concentration and synthesis conditions.

Stable single-phase powders with a crystalline cubic structure were obtained at nominal YF₃ concentrations of 20-25 mol. %. For these samples, the photoluminescence (PL) spectra were studied on a Fluorolog 3D spectrofluorimeter (Horiba Jobin Yvon) at 377 nm excitation. The HM obtained by direct precipitation with a nominal YF₃ concentration of 25 mol. % and a concentration of the initial nitrate solution of 0.8 M has the most intense PL. The HM spectra are noticeably shifted to the short wavelength region relative to the initial Liq. The short-wavelength component is clearly not related to the centers of 8-hydroxyquinolates of yttrium or lead, which exhibit PL in a longer wavelength region compared to Liq. In addition, the center cannot be attributed to specific bonds in the cubic phase of PbF₂. Thus, HMs obtained from the ternary system is very promising due to the intense and very short-wavelength PL.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the FSSM-2020-0005 project.

1. P.V. Strekalov, M.N. Mayakova, K.I. Runina, O.B. Petrova, Non-ferrous metals **10**, 25 (2021).

STUDY OF PHASE FORMATION IN THE SYSTEM LEAD FLUORIDE AND YTTERBIUM FLUORIDE BY THE CO-PRECIPIATION METHOD

M.N. Mayakova^{1,2}, O.B. Petrova¹, K.I. Runina¹, P.V. Strekalov¹

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: strekalov_pavel@mail.ru

The MF₂-REF₃ systems (where M = Ca, Sr, Ba, Pb, RE = rare earth element) form solid solutions M_{1-x}R_xF_{2+x} of cubic structure like fluorite *Fm3m*. The region of crystallization of such solid solutions at high temperatures reaches 50 mol. % REF₃. The study of phase formation in systems with PbF₂ is complicated by the presence of its polymorphism, which is not characteristic of other divalent metal fluorides [1]. A system containing ytterbium was chosen, since ytterbium has a number of advantages from the spectroscopic point of view: there is no concentration quenching of luminescence for Yb³⁺ ions, and the degree of doping with ytterbium can be very high due to the presence of only two electronic levels ²F_{7/2} and ²F_{5/2}.

Powders were synthesized in the PbF₂-YbF₃ system by co-precipitation from aqueous solutions of lead (II) nitrate and ytterbium (III) nitrate. Ammonium fluoride was chosen as the fluorinating agent. Synthesis was carried out by direct, reverse and joint precipitation, depending on the order of mixing solutions. As a result of co-precipitation in the PbF₂-YbF₃ system, powders were obtained, in their crystal structure corresponding to the low-temperature orthorhombic phase – α-PbF₂ and the high-temperature cubic phase – β-PbF₂. With the joint addition of reagents, as well as at a concentration of lead nitrate solution equal to 0.8 M, a two-phase sample is formed. And with the reverse precipitation of adding reagents with a concentration of lead nitrate solution equal to 1.43 M, with an increase in the amount of ytterbium content, the cubic phase of lead fluoride is stabilized.

The luminescence spectrum is a band with three intensity maxima at wavelengths of 971, 977, and 993 nm, which correspond to electron transitions from the excited ²F_{5/2} level to the Stark sublevels of the ground level ²F_{7/2} in Yb³⁺ ions. The maximum luminescence intensity is observed for a sample with a concentration of Yb³⁺ ions of 25 mol. %.

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the FSSM-2020-0005 project.

1. O.B. Petrova et al., Journal of Luminescence **238**, 118262 (2021).

COMPARISON OF THE STRUCTURE, THERMOELECTRIC
AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS (Bi, Sb)₂Te₃
OBTAINED BY EXTRUSION AND SPARK PLASMA SINTERING

M.G. Lavrentev^{1,2}, V.P. Panchenko³, Yu.N. Parkhomenko^{1,4},
N.Yu. Tabachkova^{1,5}, M.V. Voronov³

¹*National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia*

²*RMT Ltd, Moscow, Russia*

³*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

⁴*State Research and Design Institute of Rare Metal Industry «Giredmet»,
Moscow, Russia*

⁵*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*

E-mail: ntabachkova@misis.ru

Solid solutions based on bismuth telluride and antimony are widely used to create devices for cooling systems, as well as for power generators at temperatures up to 300 °C. Thermoelectric materials operating in power generators can experience mechanical stresses arising from a sufficiently large temperature difference between the hot and cold sides of the thermocouple. In the present work the dependence of strength characteristics of polycrystalline samples (Bi, Sb)₂Te₃ obtained by the methods of extrusion and spark plasma sintering (SPS), as well as materials obtained by extrusion in the SPS device, is studied by the method of dynamic uniaxial compression. By methods of X-ray diffractometry and scanning electron microscopy the phase composition and structure of the initial samples were studied.

Analysis of the obtained results shows that the SPS method is possible to obtain a well-sintered, mechanically durable material that does not contain pores and cracks even at a relatively low pressure of ~ 50 MPa. It is shown that the strength of samples obtained by SPS at room temperature is almost twice the strength of samples obtained by extrusion. The regularities characterizing the behavior of the material during deformation are discussed. Compared to the traditional method of hot extrusion, the extrusion in the SPS device increases the sharpness of the texture of the material. At the same time, the strength characteristics of such an extruded material are comparable to the characteristics of the material obtained by SPS. At room temperature, the strength of the samples extruded in SPS was ~ 200 MPa.

The reported study was funded by RFBR, project number 20-32-90051. The study of the structure was carried out on the equipment of the Center Collective Use «Materials Science and Metallurgy» with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Education and Science (agreement № 075-15-2021-696).

FEATURES OF COLLOIDAL – CHEMICAL SYNTHESIS OF PHOSPHORS BASED ON $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Ce}^{3+}$, Mn^{2+}

G.P. Shevchenko¹, N.V. Varapay², V.A. Zhuravkov¹

¹Research Institute for Physical Chemical Problems BSU, Minsk, Belarus

²Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E-mail: n.varapay@ifanbel.bas-net.by

The main advantage of obtaining phosphors by co-deposition, in comparison with solid-phase synthesis, is the possibility of influencing the properties of the final product by controlling the process of isolation and heat treatment of the precursor [1].

It was found that a 2-fold excess of strontium salts (relative to the stoichiometry of $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) and a temperature of 0 °C is required to obtain an unadulterated matrix SrAl_2O_4 from a precursor consisting of jointly precipitated hydroxides (JPH) of strontium and aluminum (precipitator – $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$). This is due to the high solubility of $\text{Sr}(\text{OH})_2$ (25 °C – 2.25 g and 0 °C – 0.41 g per 100 g). When NH_4HCO_3 is used as a precipitator, due to the low solubility of SrCO_3 (25 °C – 0.002 g per 100 g), the SrAl_2O_4 phase is formed in accordance with the stoichiometry of $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$. The optimal pH of deposition of the JPH precursor is an interval of 8.5 – 9.5. High temperature calcination (at least 2 hours) in the range 1300 – 1500°C leads to an increase in the luminescent intensity of the samples 2 – 2.5 times.

It is shown that the use of a colloidal – chemical approach to the synthesis of phosphors of strontium aluminates activated with Ce^{3+} and Mn^{2+} ions (fig. 1) makes it possible to significantly influence their luminescent properties. There are no such data in the literature.

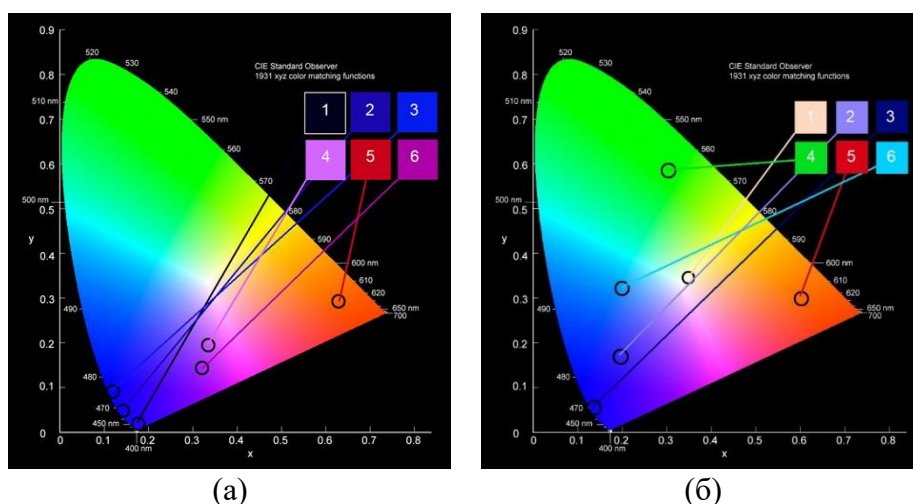


Fig. 1. Chromaticity diagram of strontium aluminates samples activated with Ce^{3+} and Mn^{2+} ions obtained by solid-phase (a) and colloidal-chemical (b) synthesis methods.

1. Y.V. Bokshits, Journal of the Belarusian State University **1**, 74 (2017).

UP-CONVERSION COMPOSITE MATERIALS BASED ON $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Er},\text{Yb}$ PHOSPHOR FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR CELLS

S.A. Bukarev, M.V. Chernov, S.V. Gushchin, A.M. Kuzmin, A.A. Lyapin
National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia
E-mail: s.bukarev@phts.ru

Modern solar cells based on various photosensitive elements (silicon, perovskites, organic dyes, etc.) operate in a rather narrow spectral wavelength range, which corresponds to 0.3 – 1.1 μm , which seriously limits the upper limit of their sensitivity. One of the ways to increase the efficiency of solar cells is to create combined cells using materials in which, under the action of infrared radiation passed through the solar cell, up-conversion luminescence occurs in the visible and IR regions of the spectrum, the radiation of which is also absorbed by the solar battery [1-3].

In the present work, the objects of study were composite films based on the $\text{La}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Er},\text{Yb}$ phosphor and polyethylene obtained using the extrusion method.

When excited to the $^4\text{I}_{13/2}$ level of Er^{3+} ions, the films exhibit intense up-conversion luminescence in the visible and infrared spectral regions, which corresponds to the electronic transitions $^4\text{G}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{5/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{7/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^2\text{H}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ of Er^{3+} ions and $^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$ of Yb^{3+} ions. In this work, the quantitative characteristics of the up-conversion luminescence of the film were determined: energy yield, chromaticity coordinates, and correlated color temperatures.

The use of the obtained up-conversion film in the design of bifacial silicon solar cells made it possible to increase the short-circuit current by 10.5%.

1. P. Gibart, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 4401 (1996).
2. A. Shalav et al., Appl. Phys. Lett. **86**, 13505 (2005).
3. B.S. Richards, A. Shalav, IEEE Trans. Electron. Devices **54**, 2679 (2007).

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НАНОСТРУКТУРАХ

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ СПИНОВ ЯДЕР P И As В КРЕМНИИ В УСЛОВИЯХ ЭПР В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Н.С. Аверкиев, М.Б. Лифшиц

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: averkiev@les.ioffe.ru

Динамическая поляризация ядер (эффект Оверхаузера) возникает в условиях ЭПР за счет сверхтонкого взаимодействия спина электрона и спина ядра, сильного различия времен спиновой релаксации электронов и ядер и процессов кросс-релаксации. Равновесная поляризация спинов ядра в магнитном поле мала из-за относительной малости ядерного магнетона Бора. Для возникновения эффекта необходимы процессы кросс-релаксации, при которых возникают переходы с переверот проекции спина электрона и спина ядра. В отсутствие внешнего переменного магнитного поля накачки система находится в термодинамическом равновесии, электронные состояния заселены в соответствии с распределением Больцмана, ядерной поляризации нет. Равновесное распределение между различными спиновыми подуровнями электрона устанавливается за счет относительно быстрых процессов спиновой релаксации (время T_1), а за счет кросс-релаксационных переходов состояния с разной проекцией спина электронов оказываются связанными. При включении переменного магнитного поля на частоте одного резонансного перехода заселенности этих двух электронных подуровней начинают выравниваться, однако за счет кросс-релаксации начинают выравниваться и заселенности других подуровней. Однако заселенности уровней, переходы в которые не возбуждаются (с одинаковой проекцией спина ядра) остаются равновесными. Это означает, что равновесие между состояниями с разной проекцией спина ядра нарушается и возникает их поляризация. В традиционных экспериментах по ЭПР используются относительно слабые внешние поля, так что различия заселенностей электронных подуровней мало. Поляризация ядер в этих условиях также мала и реализуется в условиях насыщения сигнала ЭПР.

В представленном докладе обсуждается другая ситуация: сильные магнитные поля, равновесные заселенности уровней отличаются значительно, частота переменного поля лежит в области терагерцового излучения. Рассчитаны степени поляризации ядер и зависимости интенсивностей переходов от времени и интенсивности накачки. Изучены n-Si, легированный фосфором (спин ядра $1/2$) и мышьяком (спин ядра $3/2$). Указаны условия для достижения почти 100% поляризации при относительно слабом возбуждении. Произведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными и из сравнения с расчетами определены характерные времена релаксации.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 22-12-00139.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОКРИСТАЛЛЫ И КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

А.В. Родина

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: anna.rodina@mail.ioffe.ru

Полупроводниковые квантовые точки и нанокристаллы – наноразмерные полупроводниковые частицы – широко применяются в оптоэлектронике (источники белого света, светодиоды, дисплеи и телевизоры), фотовольтаике (элементы солнечных батарей), медицине и биологии (сенсоры и метки). Основные применения квантовых точек основаны на их фундаментальном свойстве – наличии дискретного, зависящего от размера спектра электронных состояний, который определяет их оптические свойства (зависящие от размера спектры испускания и поглощения). Такой дискретный спектр, подобный спектрам атомов, формируется благодаря квантовому ограничению движения носителей заряда во всех трех пространственных направлениях. Он реализуется внутри наноразмерного полупроводника, встроенного либо в диэлектрическую среду, либо в другой полупроводник с большей шириной запрещенной зоны. В настоящее время все искусственные физические системы, обеспечивающие нулевую степень свободы для носителей заряда, называются квантовыми точками.

Существуют различные методы изготовления полупроводниковых квантовых точек, которые приводят к отличиям их свойств и специфике применений. Основные методы могут быть обобщенно разделены на две группы: эпитаксиальные (формирование квантовых точек в низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах) и химические (коллоидный синтез нанокристаллов в диэлектрическом окружении) [1]. При этом исторически первыми нульмерными (0D) квантовыми точками, в которых был обнаружен и исследован эффект размерного квантования, были полупроводниковые нанокристаллы, диспергированные в диэлектрической матрице – стекле или водном растворе. Их экспериментальные оптические и теоретические исследования в начале восьмидесятых годов положили начало новой области – физики полупроводниковых нульмерных структур, т.е. квантовых точек [2].

В своей пленарной лекции я представлю обзор и сравнительный анализ электронных и оптических свойств полупроводниковых коллоидных нанокристаллов и эпитаксиальных квантовых точек. Будут рассмотрены различные факторы, обуславливающие их общие и отличающиеся свойства с акцентом на специфику полупроводниковых коллоидных нанокристаллов. Современные технологии позволяют синтезировать коллоидные нанокристаллы и композитные наноструктуры на основе разнообразных полупроводниковых соединений с различной кристаллической структурой (сфалерита, вюрцита, перовскита, халькоперита), а также различной формы: сферические квантовые точки, вытянутые одномерные нанопалочки (нанороды), плоские двумерные

пластины (наноплателеты). Синтезированные в коллоидном растворе нанокристаллы легко встраиваются в различные материалы и исследуемые объекты, что является большим преимуществом для их применений.

Для полупроводниковых нанокристаллов в диэлектрическом окружении характерно сильное пространственное ограничение носителей заряда, как благодаря высоким энергетическим потенциальным барьерам, так и диэлектрическому контрасту между полупроводником и окружающей его матрицей. Это приводит к увеличению не только энергий размерного квантования, но и усилению всех взаимодействий между носителями заряда в нанокристаллах, в том числе спин-зависимых. Я представляю результаты наших недавних теоретических и экспериментальных (совместно с коллективом Университета г. Гента, Бельгия) исследований универсальной зависимости экситонного края поглощения от размера нанокристалла и влияния кристаллической структуры и формы нанокристаллов на экситонное поглощение [3].

Усиление спин-зависимых (обменных) взаимодействий, а также понижение симметрии нанокристаллов, обусловленных их формой или кристаллической структура полупроводника, приводят к большим энергетическим расщеплением тонкой структуры экситонных состояний. Спиновая структура экситонов, а также спин-зависимые взаимодействия экситонов с поверхностью нанокристаллов, существенно влияют на кинетику и поляризацию их фотолюминесценции [4]. В пленарной лекции будет представлен обзор наших теоретических и экспериментальных (совместно с коллективом Технического Университета г. Дортмунд, Германия) исследований оптических свойств полупроводниковых коллоидных нанокристаллов, обусловленных спин-зависимыми взаимодействиями.

Представленные в пленарной лекции результаты работ поддержаны частично Российским Научным Фондом (грант № 20-42-01008) и Российским Фондом Фундаментальных исследований (Грант № 19-52-12064 ННИО_а).

1. M. Bayer, *Ann. Phys.* **531**, 1900039 (2019).
2. Al.L. Efros, L.E. Brus, *ACS Nano*. **15**, 6192 (2021).
3. T. Aubert et al., *Nano Letters* **22** (2022).
4. А.В. Родина и др., *ФТТ*. **60**, 1525 (2018).

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ

М.С. Каган

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
E-mail: mskagan@mail.ru

В докладе планируется дать краткий обзор развития идей, экспериментальной реализации и истории использования полупроводников и полупроводниковых структур в качестве источников электрических колебаний, начиная с первых работ в конце 50-х и начале 60-х годов прошлого столетия (L. Esaki - туннельный диод, W.T. Read и А.С. Тагер - лавинно-пролетные диоды, В.К. Ridley, Т.В. Watkins и С. Nilsum - распределенная отрицательная дифференциальная проводимость, J.V. Gunn - домены в GaAs) и кончая поздними работами (квантовые каскадные лазеры, сверхрешетки и ТГц лазеры на p-Ge).

Основное направление – расширение диапазона рабочих частот генерации и последовательное освоение так называемой электромагнитной шкалы. В настоящее время остается неосвоенным на практике (хотя имеется довольно много лабораторных разработок) последняя ее часть - терагерцовый диапазон частот с длинами волн от 30 до 300 микрон.

Как это часто бывает, развитие шло по спирали: сначала использовался один принцип генерации (в данном случае были изобретены полупроводниковые элементы с отрицательной дифференциальной проводимостью), его развитие доводилось до естественных пределов, определяемых принципиальными ограничениями, лежащих в основе физических процессов, затем происходил переход к другому принципу (в данном случае к лазерам), а затем – возврат к первоначальным идеям, но уже на новых разработанных к этому времени материалах и технологиях.

Работа поддержана грантами РФФИ 20-02-00624 и 20-52-16304.

ЭФФЕКТ ГАННА: ОТ КЛАССИКИ К МОДЕРНУ

М.С. Иванов, П.Б. Родин, А.В. Рожков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

E-mail: rodin@mail.ioffe.ru

Спонтанная неустойчивость однородного распределения поля в арсениде галлия, вызванная отрицательной дифференциальной подвижностью электронов, и формирование движущихся областей сильного поля – доменов Ганна – представляют собой яркие нелинейные явления физики полупроводниковых приборов, имеющие важные применения в генерации высокочастотных колебаний [1, 2]. Открытие эффекта Ганна знаменовало собой не только появление нового прибора СВЧ диапазона, но и начало новой волны фундаментальных исследований неустойчивостей и спонтанного формирования токовых и полевых структур в полупроводниках с многозначными вольт-амперными характеристиками [3, 4]. Позднее эти структуры были переосмыслены как диссипативные солитоны в неравновесных нелинейных системах [5, 6].

Долгие годы эффект Ганна в основном рассматривался как монополярный эффект в GaAs n -типа. Пионерские теоретические работы Б.Л. Гельмонта и М.С. Шура по эффекту Ганна в присутствии дырок [7] – биполярному эффекту Ганна – не получили развития. Для монополярного – «классического» – эффекта Ганна в целом характерна изящная простота: формирование единственного домена («the-winner-takes-it-all» принцип), автомодельное движение домена через диод с постоянной скоростью дрейфа электронов v_n , генерация колебаний с периодом $T=W/v_n$, заданным временем пробега домена через образец длины W [2, 4].

Возвращение биполярного эффекта Ганна на сцену физики полупроводниковых приборов в 2000-х стало неожиданным результатом исследования в смежной к СВЧ области – быстродействующей импульсной электроники. Изучая пикосекундное переключение мощного лавинного GaAs транзистора, С.Н. Вайнштейн, В.С. Юферев и соавторы в численном эксперименте предсказали эффект спонтанного возникновения в электронно-дырочной плазме узких движущихся областей сильного ионизирующего электрического поля – биполярных доменов Ганна [8]. За свое свойство непредсказуемо исчезать (коллапсировать) эти домены получили название *коллапсирующих доменов* [8]. В дальнейшем было установлено, что коллапсирующие домены играют центральную роль во многих GaAs приборах: ключах с оптическим запуском [9, 10], лавинных диодах [11, 12], S-диодах с глубокими уровнями [13]. КД оказались также эффективным источником субтерагерцового излучения [14, 15].

Своим возникновением коллапсирующие домены Ганна, как и монополярные домены Ганна, обязаны отрицательной дифференциальной подвижности электронов в GaAs. Однако форма и динамика коллапсирующих доменов имеет мало общего как с монополярными доменами Ганна, так и биполярными доменами, предсказанными

Гельмонтом и Шуром [8]. Коллапсирующий домен представляет собой узкую (порядка микрометра) движущуюся область сильного (>300 кВ/см) электрического поля, в которой происходит интенсивная ударная ионизация. Как и монополярный домен, коллапсирующий биполярный домен в электроно-дырочной плазме двигается в сторону дрейфа электронов. Его скорость близка к дрейфовой скорости электронов ($\sim 10^7$ см/с), но меняется в зависимости от формы домена и его окружения. Коллапсирующие домены не подчиняются принципу «the-winner-takes-it-all»: в структуре одновременно сосуществуют несколько доменов. Исчезновение (коллапс) домена происходит непредсказуемо. В целом коллективная динамика коллапсирующих доменов дает пример динамического хаоса в пространственно-распределенной системе [16]. Эта хаотическая динамика разительно контрастирует с элегантной упорядоченностью монополярного эффекта Ганна. Ввиду сложной нелинейности аналитические подходы к теории коллапсирующих доменов до сих пор не разработаны, и наши представления об этом явлении опираются на численное моделирование [8-12].

Условием возникновения коллапсирующих доменов является высокая плотность тока (обычно ~ 1 МА/см²), которая обычно может быть достигнута только при протекании тока в узких каналах [8]. Требование высокой плотности тока связано с тем, что для развития неустойчивости напряженность электрического поля в электроно-дырочной плазме должна превосходить порог ОДП электронов: $E_{pl} > 3.5$ кВ/см.

Для физики полупроводниковых приборов особенно важно ионизирующее действие коллапсирующих доменов: электрическое поле в них превосходит 300 кВ/см. Вследствие этого идет интенсивная ударная ионизация, и коллапсирующий домен становится мощным источником неравновесных носителей. В то же время из-за малого размера (~ 1 мкм) падение потенциала на единичном КД составляет незначительные для мощного прибора ~ 10 В. Таким образом, присутствие в электроно-дырочной плазме, например, десяти КД способно обеспечить интенсивную ударную ионизацию при напряжении на приборе около 100 В, что на порядок меньше типичного напряжения лавинного пробоя высоковольтных приборов (~ 1 кВ) и соответствует остаточному напряжению многих высоковольтных приборов ключевого типа.

Возникновение в электроно-дырочной плазме коллапсирующих доменов делает возможным интенсивную ударную ионизацию в слабом среднем электрическом поле. Это может приводить, во-первых, к быстрому росту концентрации неравновесных носителей. Именно такой процесс обуславливает субнаносекундное переключение GaAs лавинных транзисторов [8]. Во-вторых, ионизация в коллапсирующих доменах может компенсировать рекомбинацию и дрейфовую экстракцию электроно-дырочной плазмы, обеспечивая длительное сохранение проводящего состояния прибора при низком остаточном напряжении. Это явление – так называемый lock-on эффект – наблюдается в переключателях

с оптическим запуском [17] и лавинных диодах, переключаемых импульсом обратной полярности [9, 10]. В переключателях с оптическим запуском самоподдержание проводящего состояния выражается в том, что высоковольтный фотоключ на основе полуизолирующего GaAs неограниченно долго сохраняет проводящее состояние после окончания управляющего оптического импульса [17], т.е. «залипает» в проводящем состоянии. Лавинные диоды сохраняют проводящее состояние при обратном смещении в течение времени, на порядки превышающие время дрейфовой экстракции носителей [11,12]. Lock-on эффект в перечисленных приборах может быть объяснен формированием коллапсирующих доменов [9-12]. Высказано предположение, что коллапсирующие домены ответственны и за формирование проводящего состояния в GaAs S-диодах с глубокими центрами [13].

Хаотическая динамика коллапсирующих доменов приводят к высокочастотным колебаниям, в спектре которых имеется субтерагерцовая составляющая [14]. На основе этого эффекта в лавинных транзисторах успешно созданы компактные источники субтерагерцового излучения [15].

1. J.V. Gunn, Solid State Commun. **1**, 88 (1963).
2. H. Kroemer, Proc. IEEE **52**, 1736 (1964).
3. А.Ф. Волков, Ш.М. Коган, УФН **96**, 633 (1968).
4. В.Л. Бонч-Бруевич, И.П. Звягин, А.Г. Миронов, *Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках*, М.: Наука, 1972.
5. Б.С. Кернер, В.В. Осипов, *Автосолитоны*, М.: Наука, 1991.
6. H-G. Purwins, H.U. Bödeker, Sh. Amiranashvili, Advances in Physics **59**, 485 (2010).
7. B.L. Gelmont, M.S. Shur, Phys. Lett. A **36**, 305 (1971).
8. S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, J. Appl. Phys. **97**, 024502 (2005).
9. L. Hu et al., J. Appl. Phys. **115**, 094503 (2014).
10. A.R. Chowdhury et al., Appl. Phys. **123**, 085703 (2018).
11. А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, Письма в ЖТФ **48**, 25 (2022).
12. A.V. Rozkhov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, arXiv:2206.03940v2, <https://arxiv.org/abs/2206.03940> (to appear in Sol.St.Commun.).
13. I.A. Prudaev et al., IEEE Trans. ED **66**, 57 (2021).
14. S. Vainshtein et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 176601 (2007).
15. S.N. Vainshtein et al., Appl. Phys. Lett. **115**, 123501 (2019).
16. E. Schoell, *Nonlinear spatio-temporal dynamics and chaos in semiconductors*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
17. F.J. Zutavern et al., IEEE Trans. ED **37**, 2472 (1990).

ОСОБЕННОСТИ ТУННЕЛЬНОГО ТРАНСПОРТА В СВЕРХРЕШЕТКАХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ

И.В. Алтухов¹, А.Н. Баранов², Н.Д. Ильинская³, М.С. Каган¹,
С.К. Папроцкий¹, А.А. Усикова³, Н.А. Хвальковский¹, R. Teissier²

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

²*Institute of Electronics and Systems, University of Montpellier, CNRS,
Montpellier, France*

³*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: n.khvalkovskiy@gmail.com*

Изучался туннельный электронный транспорт в сверхрешетках (СР) InAs/AlSb с электрическими доменами. Указанные СР, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии, были расположены между сильно легированными верхним контактным слоем n⁺-InAs и сильно легированной (~10¹⁹ см⁻³) подложкой. СР были легированы мелкими донорами в концентрации 2×10¹⁷ см⁻³. Изучались СР (60 периодов) с одинаковыми барьерами (3.5 нм AlSb), но с разной шириной квантовых ям: 4.5, 5 и 6 нм. К образцам прикладывались треугольные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5-10 мс. Из зависимостей напряжения и тока от времени восстанавливались вольтамперные характеристики (ВАХ) при прямой и обратной развертке напряжения.

Из-за статической отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), возникающей в СР при резонансном туннелировании между квантово-размерными состояниями в соседних квантовых ямах (механизм Эсаки-Цу), при некотором пороговом напряжении образуются электрические домены. В случае движущихся доменов наблюдается резкое падение тока. Рост тока (в среднем), наблюдаемый при напряжениях выше порогового, свидетельствует о треугольной форме дипольного домена. В области напряжений, соответствующих движущимся доменам, на ВАХ на фоне роста тока наблюдается ряд квазипериодических осцилляций, период которых зависит от ширины квантовых ям. Исследовались квазипериодические максимумы, наблюдавшиеся на ВАХ СР InAs/AlSb при напряжениях в области образования доменов. В СР с широкими КЯ период этих осцилляций соответствует расширению домена на один период СР, т.е. периодические изменения тока в СР с широкими КЯ связаны с перескоками границы домена в соседнюю квантовую яму. В СР с узкими КЯ период осцилляций по напряжению значительно больше и не соответствует перескокам границы домена между соседними КЯ. Предложено объяснение, связывающее происхождение периодических максимумов в СР с узкими КЯ со значительным увеличением максимального поля в треугольном домене, из-за чего становятся возможными туннельные переходы между соседними КЯ, сопровождающиеся испусканием оптических фононов.

Работа выполнена в рамках госзадания при частичной поддержке РФФИ (гранты 20-02-00624, -52-16304).

ТРАНСПОРТ ДЫРОК В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ АЛМАЗА, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ

И.В. Алтухов¹, А.П. Большаков², М.С. Каган¹, С.К. Папроцкий¹,
В.Г. Ральченко², Н.Б. Родионов³, Н.А. Хвальковский¹, Р.А. Хмельницкий⁴

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

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

³*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк*

⁴*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва*

E-mail: s.paprotskiy@gmail.com

Изучена проводимость алмаза, легированного бором, с омическими контактами в электрических полях до $5 \cdot 10^5$ В/см в интервале температур 74-580 К. К образцам прикладывали либо постоянное напряжение - в линейной области вольтамперной характеристики (ВАХ), либо треугольные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5-100 мкс и частотой повторения 1-100 Гц (во избежание джоулева нагрева образцов при больших напряжениях). В последнем случае ВАХ восстанавливали из зависимостей напряжения и тока от времени. Исследовались эпитаксиальные алмазные плёнки толщиной 10-12 мкм, выращенные методом газофазного химического осаждения (CVD) на подложках из кристаллов алмаза с ориентацией (100), сильно легированных бором ($\sim 2 \times 10^{19}$ см⁻³). Подложки получены методом высокого давления/высокой температуры (НРНТ). Омические контакты из сплава Ni-W толщиной ~ 35 нм наносили методом магнетронного напыления.

Определены механизмы ионизации акцепторной примеси бора электрическим полем. Установлено, что при комнатной температуре и выше из-за малой концентрации свободных дырок и большой энергии связи бора в алмазе ионизация происходит за счет эффекта Френкеля-Пула – понижения кулоновского барьера примеси в электрическом поле [1]. При пониженных температурах ионизация бора происходит за счет прямого туннелирования дырок в валентную зону (зинеровская ионизация). При температурах от комнатной до ~ 500 К температурная зависимость проводимости алмаза с бором подчиняется активационному закону. Энергия активации уменьшается в сильных электрических полях на величину френкелевского понижения примесного барьера. При более высоких температурах проводимость насыщается из-за теплового опустошения акцепторов.

По температурным зависимостям определены концентрации свободных дырок и примесей, а также степень компенсации. Обнаружено, что примеси сильно компенсированы, вероятно, в результате автокомпенсации в процессе роста структур. Степень компенсации составляла 10^{-4} - 10^{-5} при концентрации примесей $\sim 10^{16}$ см⁻³. Предложено объяснение такой автокомпенсации.

Работа выполнена в рамках госзадания.

1. J. Frenkel, Phys. Rev. **54**, 647 (1938).

ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В КРЕМНИЕВЫХ МДП-СТРУКТУРАХ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЛОЯМИ ОКСИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.М. Гурьянов¹, С.А. Гурьянов²

¹Самарский государственный технический университет, Самара

²Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: gurjanovam@mail.ru

Исследовались генерационные процессы в кремниевых МДП-структурах с наноразмерными диэлектрическими пленками оксидов редкоземельных элементов скандия, эрбия, гольмия толщиной 15 ÷ 60 нм на кремниевых подложках. Генерационные характеристики МДП-структур Al/R₂O₃/nSi/Al (R – символ редкоземельного элемента) определялись из релаксационных зависимостей емкости МДП-структуры $C(t)$ при неравновесном обеднении поверхности кремния основными носителями заряда, создаваемом прямоугольными импульсами напряжения. В данном методе к МДП-структуре прикладывается импульсное напряжение истожающей полярности, амплитуда которого достаточна для смещения приповерхностной области пространственного заряда в область инверсионных изгибов зон. При этом высокочастотная емкость C МДП-структуры становится гораздо меньше, чем равновесная инверсионная емкость C_∞ при том же самом напряжении смещения. После прекращения действия импульса напряжения, по мере генерации неравновесных носителей заряда толщина области пространственного заряда уменьшается, а высокочастотная емкость МДП-структуры увеличивается. Процесс релаксации емкости МДП-структуры, описывается уравнением:

$$-\frac{N\varepsilon_0\varepsilon_s}{2C_i} \frac{d}{dt} \left(\frac{C_i}{C} \right)^2 = n_i S + \frac{n_i\varepsilon_0\varepsilon_s}{\tau_g C_\infty} \left(\frac{C_\infty}{C} - 1 \right), \quad (1)$$

где C_i – емкость диэлектрика, отнесенная к единице площади, ε_s – диэлектрическая проницаемость полупроводника. По релаксационным кривым неравновесной емкости, полученным при различных величинах приложенного постоянного напряжения, определялись объемное время жизни неосновных носителей заряда τ_g и удельная скорость поверхностной генерации S . Указанные зависимости регистрировались в темноте, при комнатной температуре. Длительность переходного процесса релаксации неравновесной емкости разных образцов Al/R₂O₃/nSi/Al находилась в пределах 30 ÷ 500 мс. Рассчитанные значения скорости поверхностной генерации S и объемного времени жизни неосновных носителей заряда τ_g имели соответственно величины 10 ÷ 90 см/с и 0.3 ÷ 4.5 мкс. Скорость поверхностной генерации в исследованных МДП-структурах Al/Sc₂O₃/nSi/Al, Al/Er₂O₃/nSi/Al, Al/Ho₂O₃/nSi/Al на порядок меньше аналогичного параметра в кремниевых МДП-структурах с двуокисью кремния в качестве диэлектрика.

ELECTRONIC PHENOMENA IN NANOSTRUCTURES

SEMICONDUCTOR NANOCRYSTALS AND QUANTUM DOTS

A.V. Rodina

Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: anna.rodina@mail.ioffe.ru

Semiconductor quantum dots and nanocrystals – nanosized semiconductor particles – are widely used in optoelectronics (white light sources, LEDs, displays and TVs), photovoltaics (solar cells), medicine and biology (sensors and labels). The main applications of quantum dots are based on their fundamental property of having a discrete, size-dependent spectrum of electronic states, which determines their optical properties (size-dependent emission and absorption spectra). Such a discrete spectrum, similar to the spectra of atoms, is formed due to quantum confinement of charge carriers motion in all three spatial directions. It is realized inside a nanoscale semiconductor embedded either in a dielectric medium or in another semiconductor with larger band gap energy. Currently, all artificial physical systems that provide zero degree of freedom for charge carriers are called quantum dots.

There are different methods of fabrication of semiconductor quantum dots, which lead to differences in their properties and specific applications. The main methods can be divided into two groups: epitaxial (formation of quantum dots in low-dimensional semiconductor heterostructures) and chemical (colloidal synthesis of nanocrystals in a dielectric environment) [1]. Historically, the first 0D quantum dots in which the quantum size effect in all three dimensions was detected and studied were semiconductor nanocrystals dispersed in a dielectric matrix – glass or aqueous solution. Their experimental optical and theoretical studies in the early eighties initiated a new field, the physics of semiconductor zero-dimensional structures, i.e. quantum dots [2].

In my plenary lecture I will present a review and comparative analysis of the electronic and optical properties of colloidal semiconductor nanocrystals and epitaxial quantum dots. Various factors responsible for their common and different properties will be discussed, with an emphasis on the specificity of semiconductor colloidal nanocrystals. Modern technologies allow synthesizing colloidal nanocrystals and composite nanostructures based on a variety of semiconductor compounds with different crystal structures (sphalerite, wurtzite, perovskite, chalcoperite) and also with different shapes: spherical quantum dots, elongated one-dimensional nanorods, and flat two-dimensional nanoplatelets. Nanocrystals synthesized in colloidal solution are easily embedded into various materials and objects under study, which is a great advantage for their applications.

Semiconductor nanocrystals in dielectric environments are characterized by strong spatial confinement of charge carriers due to both high energy potential barriers and the dielectric contrast between the semiconductor and the surrounding matrix. This leads to an increase not only in size quantization energies, but also to the enhancement of all interactions between charge carriers

in nanocrystals, including spin-dependent ones. I will present the results of our recent theoretical and experimental (together with the team of the University of Ghent, Belgium) studies of the universal dependence of the exciton absorption edge on the nanocrystal size and the influence of the crystal structure and shape of nanocrystals on exciton absorption [3].

The enhancement of spin-dependent (exchange) interactions, as well as the decrease of the symmetry of nanocrystals due to their shape or the crystal structure of the semiconductor, leads to a large energy splitting of the fine structure of exciton states. The spin structure of excitons, as well as the spin-dependent interactions of excitons with the surface of nanocrystals, significantly affects the kinetics and polarization of their photoluminescence [4]. In this plenary lecture we will present a review of our theoretical and experimental (together with the team of the Technical University of Dortmund, Germany) studies of the optical properties of colloidal semiconductor nanocrystals caused by spin-dependent interactions.

Results presented in this plenary lecture were supported in parts by the Russian Science Foundation (Grant № 20-42-01008) and the Russian Foundation for Basic Research (Grant № 19-52-12064 NNIO_a).

1. M. Bayer, *Ann. Phys.* **531**, 1900039 (2019).
2. Al.L. Efros, L.E. Brus, *ACS Nano*. **15**, 6192 (2021).
3. T. Aubert et al., *Nano Letters* **22** (2022).
4. A.V. Rodina et al., *Physics of Solid State* **60**, 1537 (2018).

ELECTRICAL OSCILLATIONS IN SEMICONDUCTORS: HISTORY OF DEVELOPMENT AND PRINCIPLES OF OPERATION

M.S. Kagan

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia

E-mail: mskagan@mail.ru

It is planned to give the short review of the development of ideas, experimental realization and history of semiconductor and semiconductor structure sources of electric oscillations beginning from first works at the end of 50s - to early 60s of last century (L. Esaki - tunnel diodes, W.T. Read and A.S. Tager - avalanche diodes, B.K. Ridley, T.B. Watkins и C. Hilsum - distributed negative differential conductivity (NDC), J.B. Gunn - domains in GaAs) and concluding with late works (quantum cascade lasers, superlattices and p-Ge THz lasers).

The mainstream is the operation frequency range extension and successive development of so-called electromagnetic scale. At the present time, the last part of this scale - THz frequency region of wavelengths from 30 to 300 μm - remains undeveloped (however there are rather numerous laboratory THz sources).

As so often is the case, the progress went on in spiral: one generation principle was used at first (the semiconductor units with NDC were invented in this case), its development brought to natural limits of underlying physical processes, then other principles followed (lasers in this case), and the next return to initial ideas based on new materials and technologies developed by that time.

The work is supported by RFBR grants 20-02-00624 and 20-52-16304.

GUNN EFFECT: FROM CLASSICS TO MODERNITY

M.S. Ivanov, P.B. Rodin, A.V. Rozhkov
Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: rodin@mail.ioffe.ru

Spontaneous instability of a uniform field distribution in gallium arsenide, caused by the negative differential electron mobility, and the formation of moving regions of a strong field – Gunn domains – are striking nonlinear phenomena in the physics of semiconductor devices that have important applications in the generation of high-frequency oscillations [1, 2]. The discovery of the Gunn effect marked not only the appearance of a new microwave-range device, but also the beginning of fundamental research in instabilities and the spontaneous formation of current and field structures in semiconductors with multiple-valued current-voltage characteristics [3, 4]. Later, these structures were conceptualized as dissipative solitons in nonequilibrium nonlinear systems [5, 6].

For many years, the Gunn effect was mainly considered as a monopolar effect in n -type GaAs. The pioneering theoretical works by B.L. Gelmont and M.S. Shur on the Gunn effect in the presence of holes [7] – the bipolar Gunn effect - have not been developed. The monopolar – «classical» – Gunn effect is generally characterized by elegant simplicity: the formation of a solitary domain («the-winner-takes-it-all» principle), self-similar propagation of the domain through the diode with a constant electron drift velocity v_n , generation of oscillations with a period of $T = W/v_n$, determined by the domain travel time through a sample with length W [2, 4].

In late 2000s the bipolar Gunn effect surprisingly appeared again on the scene of semiconductor physics due to the research in the field adjacent to the microwave electronics – namely, the ultrafast pulse electronics. Studying the picosecond switching of a high-power GaAs avalanche transistor, S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev and co-authors predicted in a numerical experiment the effect of the spontaneous appearance of narrow moving regions of a strong ionizing electric field in an electron-hole plasma – bipolar Gunn domains [8]. For their property of unpredictably disappearing (collapsing), these domains were called *collapsing field domains* (CFDs) [8]. Subsequently, it was found that collapsing domains play a crucial role in many power GaAs devices: optically triggered switches [9, 10], avalanche diodes [11, 12], and S-diodes with deep levels [13]. CFDs also turned out to be an efficient source of subterahertz radiation [14, 15].

Collapsing Gunn domains, like monopolar Gunn domains, owe their appearance to the negative differential electron mobility in GaAs. However, the shape and dynamics of collapsing domains have little in common with either the monopolar Gunn domains or the bipolar domains predicted by Gelmont and Schur [8]. A collapsing domain is a narrow (on the order of a micrometer) moving region of a strong (> 300 kV/cm) electric field in which intense impact ionization occurs. Like a monopolar domain, a collapsing bipolar domain in an

electron-hole plasma moves in the direction of the electron drift. Its velocity is close to the drift velocity of electrons ($\sim 10^7$ cm/s), but varies depending on the shape of the domain and its surroundings. Collapsing domains do not obey the «the-winner-takes-it-all» principle: several domains coexist in the structure. The disappearance (collapse) of a domain occurs unpredictably. On the whole, the collective dynamics of collapsing domains provides an example of dynamic chaos in a spatially distributed system [16]. This chaotic dynamics contrasts strikingly with the elegant orderliness of the monopolar Gunn effect. Due to the complex nonlinearity, analytical approaches to the theory of collapsing domains have not yet been developed, and our understanding of this phenomenon is based on numerical simulation [8-12].

The condition for the appearance of collapsing domains is a high current density (usually ~ 1 MA/cm²), which can usually be achieved only when current flows in narrow channels [8]. The requirement for a high current density is due to the fact that, for the development of instability, the electric field strength in the electron-hole plasma must exceed the electron NDC threshold: $E_{pl} > 3.5$ kV/cm.

For the physics of semiconductor devices, the ionizing effect of collapsing domains is especially important: the electric field in them exceeds 300 kV/cm. As a result, intense impact ionization occurs, and the collapsing domain becomes a powerful source of nonequilibrium carriers. At the same time, due to the small size (~ 1 μ m), the potential voltage drop across a single CFD is negligible for a powerful device, ~ 10 V. Thus, the presence of, for example, ten CFDs in an electron-hole plasma can provide intense impact ionization at device voltage of about 100 V, which is an order of magnitude lower than the typical avalanche breakdown voltage of high-voltage devices (~ 1 kV) and corresponds to the residual voltage of many switching high-voltage devices.

The appearance of collapsing domains in an electron-hole plasma makes possible the intense impact ionization in a weak average electric field. This can lead, first, to a rapid increase in the concentration of nonequilibrium carriers. It is this process that causes subnanosecond switching of GaAs avalanche transistors [8]. Second, ionization in collapsing domains can compensate for the recombination and drift extraction of electron-hole plasma, providing a long-term preservation of the conducting state of the device at a low residual voltage. This phenomenon, the so-called lock-on effect, has been observed in optically triggered switches [17] and avalanche diodes switched by a reverse polarity pulse [9, 10]. In switches with optical triggering, self-sustaining of the conducting state manifests itself in the fact that a high-voltage photoconductive switch based on semi-insulating GaAs retains the conducting state for an unlimited period of time after the end of the control optical pulse [17], i.e., «locks on» in the conductive state. Avalanche diodes retain their conducting state under reverse bias for a time that is orders of magnitude longer than the carrier drift extraction time [11, 12]. The lock-on effect in these devices can be explained by the formation of collapsing domains [9-12]. It has been suggested

that the collapsing domains are also responsible for the formation of the conducting state in GaAs S⁻-diodes with deep centers [13].

The chaotic dynamics of collapsing domains leads to high-frequency oscillations, the spectrum of which contains a sub-terahertz component [14]. Based on this effect in avalanche transistors, compact sources of subterahertz radiation have been successfully created [15].

1. J.B. Gunn, *Solid State Commun.* **1**, 88 (1963).
2. H. Kroemer, *Proc. IEEE* **52**, 1736 (1964).
3. A.F. Volkov, S.M. Kogan, *Sov. Phys. JETP* **25**, 1095 (1967).
4. V.L. Bonch-Bruевич, I.P. Zvyagin, A.G. Mirionov, *Domain Electrical Instabilities in Semiconductors*, New York: Consultant Bureau, 1975.
5. B.S. Kerner, V.V. Osipov, *Autosolitons*, Dordrecht: Kluwer, 1994.
6. H-G. Purwins, H.U. Bödeker, Sh. Amiranashvili, *Advances in Physics* **59**, 485 (2010).
7. B.L. Gelmont, M.S. Shur, *Phys. Lett. A* **36**, 305 (1971).
8. S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara, *J. Appl. Phys.* **97**, 024502 (2005).
9. L. Hu et al., *J. Appl. Phys.* **115**, 094503 (2014).
10. A.R. Chowdhury et al., *Appl. Phys.* **123**, 085703 (2018).
11. A.V. Rozkhov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, *Pis'ma v ZTF* **48**, 25 (2022) [in Russian].
12. A.V. Rozkhov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, arXiv:2206.03940v2, <https://arxiv.org/abs/2206.03940> (to appear in *Sol.St.Comm.*).
13. I.A. Prudaev et al., *IEEE Trans. ED* **66**, 57 (2021).
14. S. Vainshtein et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 176601 (2007).
15. S.N. Vainshtein et al., *Appl. Phys. Lett.* **115**, 123501 (2019).
16. E. Schoell, *Nonlinear spatio-temporal dynamics and chaos in semiconductors*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
17. F.J. Zutavern et al., *IEEE Trans. ED* **37**, 2472 (1990).

PECULARITIES OF ELECTRON TUNNELING TRANSPORT IN SUPERLATTICES WITH ELECTRIC DOMAINS

I.V. Altukhov¹, A.N. Baranov², N.D. Il'inskaya³, M.S. Kagan¹,
N.A. Khvalkovskiy¹, S.K. Paprotskiy¹, R. Teissier², A.A. Usikova³

¹*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia*

²*Institute of Electronics and Systems, University of Montpellier, CNRS,
Montpellier, France*

³*Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

E-mail: n.khvalkovskiy@gmail.com

Tunneling electron transport in InAs/AlSb superlattices (SL) with electric domains was studied. These SLs grown by molecular beam epitaxy were positioned between the heavily doped top n^+ InAs cap layer and the heavily doped ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) substrate. SLs were doped with shallow donors of a concentration of $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. We studied 60-periods SLs with identical barriers (3.5 nm AlSb), but with different quantum well (QW) widths: 4, 5, and 6 nm. Triangular voltage pulses with a rise time of 0.5–10 μs were applied to the samples. The time dependences of current and voltage were used to restore I–V characteristics forward and reverse voltage sweeping.

The static negative differential conductivity (NDC) arising in superlattices at resonant tunneling between confined states in neighboring quantum wells gives rise to electrical domains formation. The step-like decrease in current at some threshold voltage is caused by moving domain formation. The current rise at voltages above the threshold indicates the triangular form of the domain. At voltages when moving domains are formed, the series of quasi-periodic maxima in the I–V characteristics of InAs/AlSb SLs are observed. Their periods depend on QW widths. The period of the oscillations in SLs with wide QWs corresponds to the domain widening by one SL period that is the periodic changes in current are caused by jumps of domain boundary into the neighboring QW. The period of the oscillations in SLs with narrow QWs is essentially larger and don't correspond the jumps between the neighboring QWs. The explanation is proposed that connects the maxima in SLs with narrow QWs with a significant increase of electric field inside the the triangular domain making possible tunneling transitions between QWs accompanied by the optical phononemission.

This research was carried out within the framework of the state task with partial support from the RFBR (grants 20-02-00624, 20-52-16304).

HOLE TRANSPORT IN SINGLE-CRYSTAL BORON-DOPED DIAMOND FILMS

I.V. Altukhov¹, A.P. Bol'shakov², M.S. Kagan¹, R.A. Khmel'nitskiy³,
N.A. Khvalkovskiy¹, S.K. Paprotskiy¹, V.G. Ral'chenko², N.B. Rodionov⁴
¹*Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow, Russia*
²*Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia*
³*Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia*
⁴*Institute of Innovative and Thermonuclear Research, Troitsk, Russia*
E-mail: s.paprotskiy@gmail.com

The conductivity of boron-doped diamond with ohmic contacts at electric fields up to $5 \cdot 10^5$ V/cm in the temperature range 74-580 K was studied. A direct voltage (in the linear region of the current-voltage characteristic) or triangular voltage pulses with a rising time of 0.5-100 μ s and a repetition rate of 1-100 Hz were applied to the samples (to avoid Joule heating of samples at high voltages). In the latter case, the I-V characteristics were reconstructed from the time dependences of voltage and current. We studied epitaxial 10-12 μ m thick diamond films grown by chemical vapor deposition (CVD) on synthetic HPHT-diamond substrates with (100) orientation heavily doped with boron ($\sim 2 \times 10^{19}$ cm⁻³). Ohmic contacts of ~ 35 nm thick Ni-W alloy were deposited by magnetron sputtering.

The mechanisms of ionization of acceptor boron impurity by electric field are determined. At room temperature and above, because of the low free hole concentration and the high binding energy of boron in diamond, the ionization of boron acceptors is due to Poole-Frenkel' effect [1] (the lowering of Coulomb potential barrier of impurity by an external electric field). At low temperatures, the ionization of boron occurs due to the direct tunneling of holes into the valence band (Zener ionization).

At temperatures from room up to ~ 500 K, the temperature dependence of the conductivity of diamond with boron obeys the activation law. The activation energy decreases in strong electric fields by the Frenkel' energy of impurity barrier lowering. At higher temperatures, the conductivity saturates due to the thermal depopulation of acceptors.

From the temperature dependences, the concentrations of free holes and impurities, as well as the compensation ratio are determined. It was found that the impurities are strongly compensated, probably as a result of self-compensation during the growth of the structures. The compensation ratio was 10^{-4} - 10^{-5} at an impurity concentration of $\sim 10^{16}$ cm⁻³. The explanation of the self-compensation is suggested.

The work was carried out within the framework of the state task.

1. J. Frenkel, Phys. Rev. **54**, 647 (1938).

GENERATION PROCESSES IN SILICON MIS STRUCTURES WITH NANOSIZED DIELECTRIC LAYERS OF RARE-EARTH OXIDES

A.M. Guryanov¹, S.A. Guryanov²

¹*Samara State Technical University, Samara, Russia*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

E-mail: gurjanovam@mail.ru

Generation processes in silicon MIS structures with nanosized dielectric films of oxides of rare earth elements scandium, erbium, holmium 15 ÷ 60 nm thick on silicon substrates were studied. The lasing characteristics of the MIS structures Al/R₂O₃/nSi/Al (R is the symbol of a rare earth element) were determined from the relaxation dependences of the capacitance of the MIS structure $C(t)$ at nonequilibrium depletion of the silicon surface by the majority charge carriers, which is created by rectangular voltage pulses. In this method, a pulsed voltage of depleting polarity is applied to the MIS structure, the amplitude of which is sufficient to shift the near-surface region of the space charge into the region of inversion bending of the bands. In this case, the high-frequency capacitance C of the MIS structure becomes much smaller than the equilibrium inversion capacitance C_∞ at the same bias voltage. After the termination of the voltage pulse, as nonequilibrium charge carriers are generated, region of the space charge thickness decreases, and the high-frequency capacitance of the MIS structure increases. The process of relaxation of the capacitance of the MIS structure is described by the equation:

$$-\frac{N\varepsilon_0\varepsilon_s}{2C_i} \frac{d}{dt} \left(\frac{C_i}{C} \right)^2 = n_i S + \frac{n_i\varepsilon_0\varepsilon_s}{\tau_g C_\infty} \left(\frac{C_\infty}{C} - 1 \right), \quad (1)$$

where C_i is the capacitance of the dielectric per unit area, ε_s is the permittivity of the semiconductor. The nonequilibrium capacitance relaxation curves obtained at different values of the applied constant voltage were used to determine the volume lifetime of minority charge carriers τ_g and the specific surface generation rate S . These dependences were recorded in the dark, at room temperature. The duration of the transient process of relaxation of the nonequilibrium capacitance of different Al/R₂O₃/nSi/Al samples was within 30 ÷ 500 ms. The calculated values of the surface generation rate S and the volume lifetime of minority charge carriers τ_g were 10 ÷ 90 cm/s and 0.3 ÷ 4.5 μ s, respectively. The surface generation rate in the studied MIS structures Al/Sc₂O₃/nSi/Al, Al/Er₂O₃/nSi/Al, Al/Ho₂O₃/nSi/Al is an order of magnitude lower than the similar parameter in silicon MIS structures with silicon dioxide as a dielectric.

СПИСОК АВТОРОВ

Аверкиев Н.С.	186
Аветисов И.Х.	148
Аветисов Р.И.	132
Агеев В.П.	58, 110
Азанова И.С.	24, 27
Алтухов И.В.	193, 194
Алябина Н.А.	64
Андреева М.Ю.	149
Анисимов Р.А.	59
Анурова М.О.	143
Артемов С.А.	109
Арутюнян Н.Р.	25
Архарова Н.А.	63, 152
Асланов С.В.	57
Бакаева А.В.	141
Балуева К.В.	144
Баранов А.Н.	193
Барыкина С.Е.	134
Белоусов Д.А.	134
Беляев А.Н.	109, 110
Болдырев К.Н.	77, 131, 139
Большаков А.П.	194
Борик М.А.	137
Бородин Б.Р.	54
Бузаева М.В.	61
Букарев С.А.	154
Буланов А.Д.	128
Бутенков Д.А.	127, 141, 148
Бучинская И.И.	83
Бушукина О.С.	109, 110
Вайнер Ю.Г.	56
Варапай Н.В.	153
Васин С.В.	142
Вахрушев А.С.	27
Ведь М.В.	55
Вельмужов А.П.	23, 26
Верещагин Ф.В.	56
Волкова Д.В.	147
Воронов М.В.	151
Галимов А.И.	53
Глухов И.А.	84
Голубев Н.В.	124
Гревцева И.Г.	62
Грибко В.В.	85
Гришечкин М.Б.	148
Гурьянов А.М.	195

Гурьянов С.А.	195
Гущин С.В.	60, 154
Дадоев Ю.С.	84
Данилов Ю.А.	55
Денисов С.А.	64
Дерепко В.Н.	62
Диденко Я.С.	79
Дорохин М.В.	55
Евдокимов И.И.	23
Ефимов М.С.	142
Жарков М.Н.	58
Жегучева Ю.В.	138
Жукова Л.В.	28, 133, 134, 135
Журавков В.А.	153
Задиранов Ю.М.	53
Зверев П.Г.	81
Звонков Б.Н.	55
Зими́на Ю.И.	79
Зиятдинова М.З.	124
Золотовский И.О.	30, 31
Зубков С.Ю.	55
Зыкова С.С.	143
Иванов М.С.	190
Игнатова К.Ф.	128, 144
Игнатъева Е.С.	124
Ильинская Н.Д.	193
Каган М.С.	189, 193, 194
Казанов Д.Р.	53
Камынин В.А.	25
Каримов Д.Н.	63, 83, 152
Климко Г.В.	53
Ковгар В.В.	124
Комова М.Г.	145
Комшина М.Е.	128, 144
Кондрашин В.М.	28, 133
Копьева М.С.	25
Корсаков А.С.	28, 133, 134, 135
Костин С.В.	109, 110
Кочубей В.И.	59
Кошелев А.В.	63, 152
Крутько В.А.	145
Крюков Р.Н.	55
Кудрин А.В.	55
Кудряшов М.В.	129
Кузнецов С.В.	60
Кузьмин А.М.	154
Кулагина М.М.	53
Кулебякин А.В.	137

Кулешова К.В.	79
Куликов О.А.	58, 110
Кутьин А.М.	144
Лаврентьев М.Г.	151
Лапин В.А.	30, 31
Лаптева Ю.А.	24
Ларина Н.А.	82, 130, 140
Лашманов Е.Н.	80
Лесников В.П.	55
Летягин Т.С.	148
Лис Д.А.	79
Лис О.Н.	79
Лисенков В.В.	49
Лифшиц М.Б.	186
Лобанов А.И.	25
Лойко П.А.	79
Ломова М.В.	59
Ломонова Е.Е.	82, 130, 137, 140
Львов А.Е.	28, 133, 134, 135
Ляпин А.А.	60, 109, 154
Макарова И.А.	61
Малашкевич Г.Е.	124
Матюшкина В.П.	29
Маякова М.Н.	143, 149, 150
Милович Ф.О.	137
Минаев В.П.	100
Моисеев С.Г.	84
Молчанов И.О.	24
Молчанова А.Д.	131
Морозов Д.А.	82
Мызина В.А.	137
Николичев Д.Е.	55
Нищев К.Н.	29
Образцова Е.Д.	25
Орехов А.С.	152
Орловский Ю.В.	56
Осипов В.В.	49
Павлов С.К.	79
Пакулева А.А.	146
Панченко В.П.	151
Папроцкий С.К.	193, 194
Пархоменко Ю.Н.	151
Перепелица А.С.	57, 62
Першукевич П.П.	124
Пестерева П.В.	28, 133
Петрова К.В.	145
Петрова О.Б.	127, 132, 141, 143, 149, 150
Петросян Т.К.	136

Платонов В.В.	49
Плехович А.Д.	144
Плехович Д.А.	23
Поминова Д.В.	111, 145
Попкова Л.В.	132
Попова М.Н.	77
Поспелова Е.А.	32
Пройдакова В.Ю.	60, 111
Прохоров А.П.	85
Пыненков А.А.	29
Пятаев Н.А.	58
Ральченко В.Г.	194
Рахлин М.В.	53
Родин П.Б.	190
Родина А.В.	187
Родионов Н.Б.	194
Рожков А.В.	190
Романишкин И.Д.	111
Ростокина Е.Е.	144
Рунина К.И.	127, 132, 141, 143, 148, 150
Рябова А.В.	111
Рябочкина П.А.	60, 82, 109, 110, 130, 140
Савенко Л.М.	138
Садовникова Я.Э.	25
Салимгареев Д.Д.	28, 133, 134, 135
Севрюкова А.Н.	85
Седов В.С.	139
Секачева А.Ю.	132
Сектаров Э.С.	139
Семенцов Д.И.	30, 31
Сергеев В.А.	61, 142
Серкина К.С.	147
Сигаев В.Н.	124
Силаев Г.О.	56
Сироткин А.А.	81
Сластухина А.М.	127
Сметанин С.Н.	76
Смирнов И.В.	81
Смирнова А.Н.	32
Соломатина В.А.	148
Сомов Н.В.	129, 146
Сорокин С.В.	53
Станишевский И.В.	124
Степанова В.Д.	27
Степанова И.В.	138, 147
Стрекалов П.В.	149, 150
Субботин К.А.	79
Суханов М.В.	23

Суханова Г.В.	136
Сухоруков Г.Б.	58
Табачкова Н.Ю.	130, 137, 151
Таратынова А.Д.	109
Тебеньков А.В.	136
Титов А.И.	79
Титова А.М.	64
Тихомирова Г.В.	136
Тихонов Е.В.	49
Торопов А.А.	53
Трикшев А.И.	25
Трофимова А.А.	147
Трошин О.Ю.	128
Тюрина Е.А.	26
Усикова А.А.	193
Федоров П.П.	60
Филатова С.А.	25
Фирстов С.В.	18
Хайдуков К.В.	63
Хвальковский Н.А.	193, 194
Хмельницкий Р.А.	194
Хрущалина С.А.	109, 110
Чалков В.Ю.	64
Чернов Е.И.	140
Чернов М.В.	154
Числов А.С.	137
Чупрунов Е.В.	146
Шайдулин А.Т.	56
Шаронова Ю.О.	27
Шатунова Д.В.	135
Шевцова А.Д.	27
Шевченко Г.П.	153
Шенгуров В.Г.	64
Шляпкина В.И.	58, 110
Щукина А.А.	135
Южаков И.В.	133
Южакова А.А.	28, 133, 134, 135
Юрлов И.А.	110
Якобсон Д.Э.	58
Янина И.Ю.	59

AUTHOR INDEX

Ageev V.P.	68, 121
Altukhov I.V.	203, 204
Alyabina N.A.	74
Andreeva M.Yu.	180
Anisimov R.A.	69
Anurova M.O.	174
Arkharova N.A.	73
Artemov S.A.	87
Arutyunyan H.R.	41
Aslanov S.V.	67
Avetisov R.I.	164
Avetissov I.Ch.	179
Azanova I.S.	40, 43
Bakaeva A.V.	173
Balueva K.V.	175
Baranov A.N.	203
Barykina S.E.	166
Belousov D.A.	166
Belyaev A.N.	121
Bentivegna F.F.L.	84, 97
Bol'shakov A.P.	204
Boldyrev K.N.	89, 163, 171
Borik M.A.	169
Buchinskaya I.I.	96
Bukarev S.A.	184
Bulanov A.D.	160
Bushukina O.S.	121
Butenkov D.A.	159, 173, 179
Buzaeva M.V.	71
Chalkov V.Yu.	74
Chernov E.I.	172
Chernov M.V.	184
Chislov A.S.	169
Chuprunov E.V.	177
Dadoenkova Y.S.	97
Denisov S.A.	74
Derepko V.N.	72
Didenko Y.S.	91, 92
Dinh Trung Do	132, 164
Evdokimov I.I.	39
Fedorov P.P.	70
Filatova S.A.	41
Firstov S.V.	34
Glukhov I.A.	97
Golubev N.V.	156
Grevtseva I.G.	72

Gribko V.V.	98
Grishechkin M.B.	179
Guryanov A.M.	205
Guryanov S.A.	205
Gushchin S.V.	70, 184
Ignatieva E.S.	156
Ignatova K.F.	160, 175
Il'inskaya N.D.	203
Ivanov M.S.	200
Kagan M.S.	199, 203, 204
Kamynin V.A.	41
Karimov D.N.	73, 96
Khaydukov K.V.	73
Khmel'nitskiy R.A.	204
Khrushchalina S.A.	121
Khvalkovskiy N.A.	203, 204
Kochubey V.I.	69
Komova M.G.	176
Komshina M.E.	160, 175
Kondrashin V.M.	44, 165
Kopyeva M.S.	41
Korsakov A.S.	44, 165, 166, 167
Koshelev A.V.	73
Kouhar V.V.	156
Krutko V.A.	176
Kudryashov M.V.	161
Kulebyakin A.V.	169
Kuleshova K.V.	91, 92
Kulikov O.A.	68, 121
Kutin A.M.	175
Kuzmin A.M.	184
Kuznetsov S.V.	70
Lapin V.A.	45, 46
Lapteva Y.A.	40
Larina N.A.	95, 162, 172
Lashmanov E.N.	93
Lavrentev M.G.	182
Letyagin T.S.	179
Lis D.A.	91, 92
Lis O.N.	91
Lobanov A.I.	41
Lomonova E.E.	87, 95, 162, 169, 172
Lomova M.V.	69
Loyko P.A.	91
Lvov A.E.	44, 165, 166, 167
Lyapin A.A.	70, 184
Makarova I.A.	71
Malashkevich G.E.	156

Mayakova M.N.	174, 180, 181
Milovich F.O.	169
Minaev V.P.	113
Moiseev S.G.	97
Molchanov I.O.	40
Molchanova A.D.	163
Morozov D.A.	95
Myzina V.A.	169
Obraztsova E.D.	41
Orlovskii Yu.V.	66
Pakuleva A.A.	177
Panchenko V.P.	182
Pankratov V.	87
Paprotskiy S.K.	203, 204
Parkhomenko Yu.N.	182
Pavlov S.K.	91, 92
Perepelitsa A.S.	67, 72
Pershukevich P.P.	156
Pestereva P.V.	44, 165
Petrosyan T.K.	168
Petrova K.V.	176
Petrova O.B.	159, 164, 173, 174, 180, 181
Plekhovich A.D.	175
Plekhovich D.A.	39
Pominova D.V.	122, 176
Popkova L.V.	164
Popova M.N.	89
Pospelova E.A.	47
Prokhorov A.P.	98
Proydakova V.Yu.	70, 122
Pyataev N.A.	68
Ral'chenko V.G.	204
Rodin P.B.	200
Rodina A.V.	197
Rodionov N.B.	204
Romanishkin I.D.	122
Rostokina E.E.	175
Rozhkov A.V.	200
Runina K.I.	159, 164, 173, 174, 179, 181
Ryabochkina P.A.	70, 87, 95, 121, 162, 172
Ryabova A.V.	122
Sadovnikova Ya.E.	41
Salimgareev D.D.	44, 165, 166, 167
Sanina V.V.	92
Savenko L.M.	170
Schukina A.A.	167
Sedov V.S.	171
Sekacheva A.U.	164

Sektarov E.S.	171
Sementsov D.I.	45, 46
Sergeev V.A.	71
Serkina K.S.	178
Sevryukova A.N.	98
Sharonova Yu.O.	43
Shatunova D.V.	167
Shaydulin A.T.	66
Shengurov V.G.	74
Shevchenko G.P.	183
Shevtsova A.D.	43
Shlyapkina V.I.	68, 121
Sidorova N.V.	87
Sigaev V.N.	156
Silaev G.O.	66
Sirotkin A.A.	94
Slastuhina A.M.	159
Smirnov I.V.	94
Smirnova A.N.	47
Solomatina V.A.	179
Somov N.V.	161, 177
Stanisheuski I.V.	156
Stepanova I.V.	170, 178
Stepanova V.D.	43
Strekalov P.V.	180, 181
Subbotin K.A.	91, 92
Sukhanov M.V.	39
Sukhanova G.V.	168
Sukhorukov G.B.	68
Tabachkova N. Yu.	162, 169, 182
Tebekov A.V.	168
Teissier R.	193, 203
Thu Trang Ta	132, 164
Tikhomirova G.V.	168
Titov A.I.	91, 92
Titova A.M.	74
Trikshev A.I.	41
Trofimova A.A.	178
Troshin O. Yu.	160
Tyurina E.A.	42
Usikova A.A.	203
Vahrushev A.S.	43
Vainer Yu.G.	66
Van Luong Nguyen	132, 164
Varapay N.V.	183
Velmuzhov A.P.	39, 42
Vereschagin F.V.	66
Volkov P.A.	92

Volkova D.V.	178
Voronov M.V.	182
Yakobson D.E.	68
Yanina I.Yu.	69
Yurlov I.A.	121
Yuzhakov I.V.	165
Yuzhakova A.A.	44, 165, 166, 167
Zharkov M.N.	68
Zhegucheva Yu.V.	170
Zhukova L.V.	44, 165, 166, 167
Zhuravkov V.A.	183
Zimina Y.I.	91, 92
Ziyatdinova M.Z.	156
Zolotovskii I.O.	45, 46
Zverev P.G.	94
Zykova C.C.	174

Научное издание

**МАТЕРИАЛЫ НАНО-, МИКРО-, ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
И ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ:
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

**Программа и материалы
19-й Международной научной конференции-школы**

*Печатается в авторской редакции
в соответствии с представленным
оригинал-макетом*

**Подписано в печать 00.09.22. Формат 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 12,79. Тираж 130 экз. Заказ №**

Издательство Мордовского университета
Типография Издательства Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24