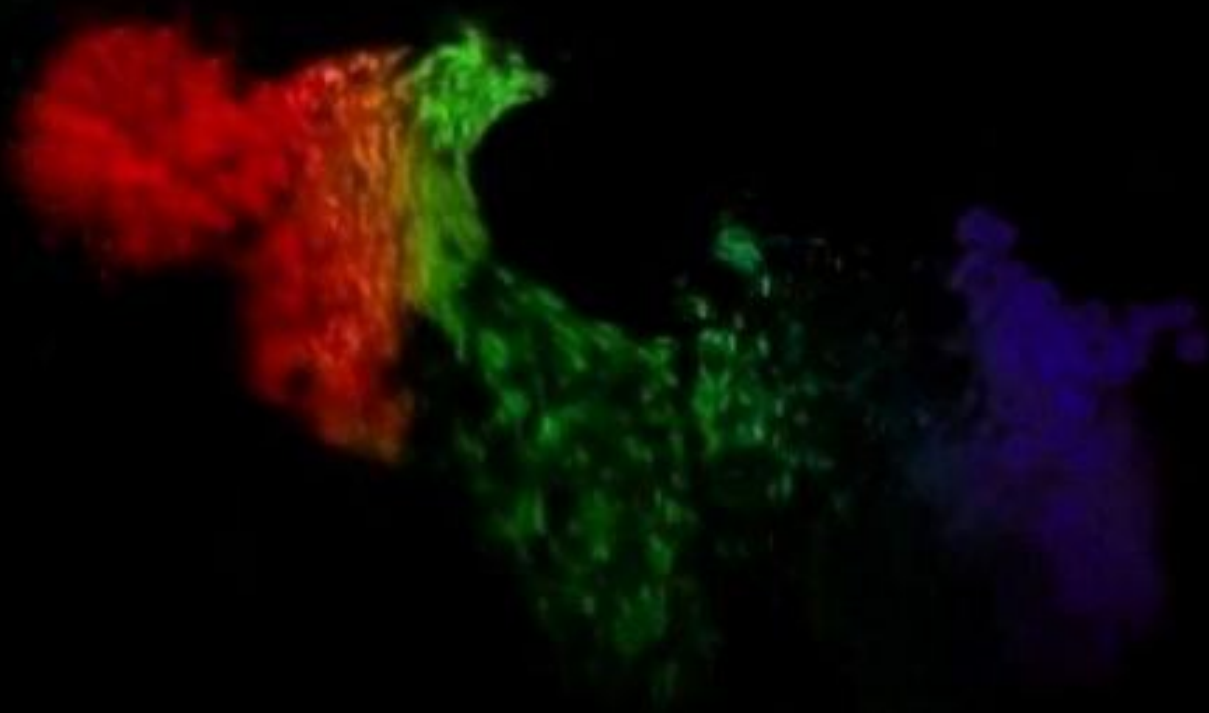


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук»



# ШКОЛА - КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ «ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»



## ТЕЗИЗЫ ДОКЛАДОВ

22 – 24 октября 2024 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»



**ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ**  
**«ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»**

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**22–24 октября 2024 г.**  
**Москва**

УДК 53; 535; 537; 538,9

**VII Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели».**  
22–24 октября 2024 г., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Москва, Российская Федерация. Тезисы докладов. — Москва, 2024. — 232 с.

**ISBN 978-5-905109-12-6**

В сборник включены тексты подготовленных молодыми учёными докладов, представленных на школе-конференции молодых учёных Федерального исследовательского центра «Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН) «Прохоровские недели», даты проведения — 22–24 октября 2024 г. Форум научной молодежи – молодых ученых, аспирантов и студентов старших курсов научных организаций и университетов – включает оригинальные доклады участников по всем основным направлениям научной деятельности ИОФ РАН.

### **ОРГАНИЗАТОРЫ:**

Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»  
при поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации  
(соглашение № 075-15-2022-315 от 20 апреля 2022 г.).

**Председатель конференции:** В.В. Глушков, д.ф.-м.н., доцент.

**Заместитель председателя:** С.А. Филатова, к.ф.-м.н.

### **Оргкомитет:**

М.Я. Гришин, к.ф.-м.н.

А.В. Кулебякин, к.т.н.

Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.

А.Н. Самарин, к.ф.-м.н.

П.Д. Харитонов

Е.Э. Дунаева, к.т.н.

М.Н. Маякова, к.х.н.

И.Д. Романишкин

Е.В. Троц

В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н.

### **Программный комитет:**

Председатель – В.В. Глушков, д.ф.-м.н., доцент,

М.Я. Гришин, к.ф.-м.н.

А.В. Кулебякин, к.т.н.

Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.

В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н.

Е.Э. Дунаева, к.т.н.

М.Н. Маякова, к.х.н.

С.А. Филатова, к.ф.-м.н.

Время проведения конференции — 22–24 октября 2024 г.

Место проведения — ИОФ РАН, Москва, ул. Вавилова, д.38, корп. 1, 3 этаж,  
конференц-зал

<https://pw-conf.gpi.ru>, <https://www.gpi.ru/sci/conferences/youngconf/2024/>

© Коллектив авторов, 2024

© Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

## Содержание

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА .....                                                                                                                         | 8  |
| Лазерный синтез наночастиц бора для бор-нейтронозахватной терапии ...                                                                                             | 8  |
| Исследование волновых механизмов при формировании периодических структур с помощью пикосекундной лазерной абляции металлов в воздухе.....                         | 10 |
| Твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой на керамике $Y_2O_3:Tm$ .....                                                                                    | 12 |
| Дефекты структуры оптических преформ и изготовленных из них кварцевых оптических волокон .....                                                                    | 15 |
| Подавление усиленного спонтанного излучения на 1030 нм в иттербиевом усилителе, излучающем на длине волны 976 нм.....                                             | 17 |
| Моделирование поляризационно-зависимого усиления в германо- и фосфоросиликатных висмутовых световодах.....                                                        | 20 |
| Исследование параметра дисперсии групповой скорости в композитном $Er/Yb$ активном волокне .....                                                                  | 23 |
| Исследование дымовых шлейфов в тропосфере с использованием 5-канального флуоресцентного лидара.....                                                               | 26 |
| Гелий-ксеноновый газоразрядный волоконный лазер .....                                                                                                             | 29 |
| Прямая лазерная запись спиральной волноведущей брэгговской решётки в иттербий-эрбиевом фосфатном стекле.....                                                      | 32 |
| Мультистабильность в системе связанных оптических микрорезонаторов с термо-оптической нелинейностью .....                                                         | 35 |
| Оптимизация волоконного встречного ввода накачки через боковую поверхность в конусном световоде, легированном иттербием .....                                     | 37 |
| Экспресс-анализ селена в почве спектроскопией лазерно-индуцированной плазмы .....                                                                                 | 40 |
| Лазерный дальномер на основе время-цифрового преобразователя .....                                                                                                | 42 |
| Исследование способов объёмной намотки резонатора кольцевого волоконного лазера ультракоротких импульсов на основе эффекта нелинейного вращения поляризации ..... | 45 |
| Датчик формы на основе многосердцевинного оптического волокна с брэгговскими решётками .....                                                                      | 48 |
| Апробация $LiGaSe_2$ с антиотражающими микроструктурами в качестве активной нелинейной среды для параметрического преобразования                                  |    |

|                                                                                                                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| лазерного излучения в средний инфракрасный диапазон (5–9 мкм).....                                                                                                                               | 51        |
| Релятивистская ионизация тяжёлых атомов в поле жёстко<br>фокусированных лазерных пучков экстремальной интенсивности .....                                                                        | 54        |
| Определение степени окисления платины в комплексах с органическим<br>реагентом диэтилдитиокарбаматом методом масс-спектрометрии с<br>лазерной десорбцией/ионизацией.....                         | 57        |
| Перестраиваемый лазер с использованием оптического фильтра на основе<br>конического волокна .....                                                                                                | 60        |
| Исследование модовой динамики в волоконном лазере с коротким<br>резонатором .....                                                                                                                | 63        |
| <b>КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И<br/>НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ .....</b>                                                                                                             | <b>66</b> |
| Влияние примеси на поверхностный электронный транспорт в<br>$R_{0,02}Sm_{0,98}B_6$ ( $R$ — Eu, Gd, Yb).....                                                                                      | 66        |
| Электропроводность титан-углеродных нанокompозитов .....                                                                                                                                         | 69        |
| Тонкие пленки CdTe на подложках из кремния и сапфира: напыление и<br>характеризация .....                                                                                                        | 72        |
| Влияние подсветки на терагерцовую проводимость и время жизни<br>верхнего лазерного уровня иона железа в кристаллах ZnSe. ....                                                                    | 75        |
| Статическая и динамическая намагниченность в тройном карбиде $GdCoC_2$<br>.....                                                                                                                  | 78        |
| Лазерная спектральная селекция оптических тетрагональных центров<br>иона $Er^{3+}$ на переходе $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ в кристаллах $CaF_2:x\%Er^{3+}$ при низкой<br>температуре..... | 80        |
| Формирование сингулярностей типа ван Хова при распространении<br>волнового поля в одномерной стратифицированной среде .....                                                                      | 83        |
| Структурная аномалия в жидких пниктогенах: DFT анализ сурьмы.....                                                                                                                                | 86        |
| <b>НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И НАНОСТРУКТУРЫ.....</b>                                                                                                                                      | <b>88</b> |
| Спектроскопия ионов эрбия, тулия и гольмия в новых оксохлоридных<br>свинцово-теллуритных стёклах .....                                                                                           | 88        |
| Новая матрица для ап-конверсии .....                                                                                                                                                             | 91        |
| Получение и характеристика массивов Si микровискеров,<br>декорированных SiC на верхушке.....                                                                                                     | 93        |
| Характеризация нового кристалла $Sr_{0,86}Ba_{0,14}MoO_4$ для преобразования<br>излучения с помощью эффекта вынужденного комбинационного<br>рассеяния (ВКР) .....                                | 96        |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Изучение свойств твёрдых растворов состава $\text{Eu}^{3+}:\text{Ca}_x\text{Na}_{(1-x)/2}\text{Gd}_{(1-x)/2}\text{MoO}_4$ ( $x = 0-1$ ).....                          | 99  |
| Альгинатные гидрогели на основе ионов иттрия и висмута как носители радионуклидов для радиоэмболизации .....                                                          | 102 |
| Транспортные характеристики монокристаллического высокоэнтропийного кубического твёрдого раствора на основе диоксида циркония.....                                    | 105 |
| Спектрально-люминесцентные, механические и лазерные генерационные характеристики нового лазерного кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{ZnWO}_4$ .....                      | 108 |
| Анализ степени кристалличности полиэтилентерефталата методом спектроскопии комбинационного рассеяния света .....                                                      | 111 |
| Долговременная стабильность проводимости монокристаллов твёрдых растворов $(\text{ZrO}_2)_{0,90}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{(0,1-x)}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_x$ .....     | 114 |
| Характеризация внутренней структуры тридецилата холестерина с добавлением углеродных наноструктур при помощи моделей сдвиговой вязкости неньютоновских жидкостей..... | 117 |
| Исследование оптических градиентных волноводов на основе активного стекла.....                                                                                        | 120 |
| Исследование межволоконного пространства СВМПЭ волокон .....                                                                                                          | 122 |
| Исследование электрических свойств и характеристика металлполимерного проводника на основе серебросодержащих нанопроволок.....                                        | 124 |
| Синтез прозрачных катодов для $\mu\text{OLED}$ дисплеев.....                                                                                                          | 127 |
| Реальная структура и свойства кристаллов $\text{CdTe}$ с различным составом .....                                                                                     | 129 |
| Влияние кристаллографической ориентации поверхности кристаллов $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$ на интенсивность низкотемпературной деградации .. | 132 |
| Свинцово-галлатные стёкла, легированные редкоземельными ионами, для применений в лазерах диапазона 2–3 мкм .....                                                      | 134 |
| Новые люминесцентные композитные материалы на основе CVD алмаза: синтез, морфология и оптические свойства.....                                                        | 137 |
| Исследование и характеристика структуры нанопроволок $\text{FeCoCu}$ .....                                                                                            | 139 |
| Влияние особенностей получения нанопроволок $\text{FeCo}$ методом матричного синтеза на их структуру и магнитные свойства .....                                       | 142 |
| Электрооптические параметры нематического жидкого кристалла с наночастицами золота.....                                                                               | 146 |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....                                                                                                                           | 149 |
| Образование кристаллических структур (Mo/W) при воздействии микроволнового излучения на порошки .....                                                                 | 149 |
| Прямая конверсия углекислого газа в плазме коронного разряда.....                                                                                                     | 152 |
| Математическое моделирование излучения плазменной антенны и исследование ее характеристик методом поверхностного резонанса в тлеющем и высокочастотном разряде.....   | 155 |
| Плазменные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности.....                                                                                              | 156 |
| Термодинамическая оценка реакций, сопровождающих газофазный рост и травление алмаза в смеси водорода, метана и кислорода.....                                         | 158 |
| Термодинамика травления алмаза на воздухе без участия плазмы и с образованием плазмы.....                                                                             | 160 |
| Измерения концентрации плазмы в газоразрядной трубке плазменной антенны .....                                                                                         | 162 |
| Моделирование движения частиц в токовом слое лабораторной установки ТС-3DM с различными конфигурациями магнитных полей .....                                          | 165 |
| ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....                                                                                                                    | 167 |
| Разработка адаптивного биосенсора с молекулярно-регулируемой плотностью центров связывания на сенсорной поверхности для обнаружения низкомолекулярных соединений..... | 167 |
| Анализ каротиноидов в сложных многокомпонентных системах и смесях методом спектроскопии комбинационного рассеяния света .....                                         | 169 |
| Идентификация активного центра первичной структуры бычьего коллагена I типа с помощью AutoDock 4.....                                                                 | 172 |
| Влияние комплексов наночастиц селена и наночастиц цинка на урожайность сельскохозяйственных культур.....                                                              | 175 |
| Анализ структуры полиэтиленгликолей методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.....                                                                        | 178 |
| Восстановление оптических свойств тканей желудочно-кишечного тракта путем обработки спектральных данных.....                                                          | 181 |
| Возможности спектроскопии КР при анализе биологически активных добавок, содержащих омега-3 жирные кислоты.....                                                        | 183 |
| Метод химически-активированной лазерной десорбции/ионизации в масс-спектрометрическом определении 8-замещенных производных хинолина .....                             | 185 |

|                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Структурный анализ материалов на основе поли(L-лактида):<br>спектроскопия комбинационного рассеяния света и моделирование<br>методом функционала плотности .....                                                                   | 188 |
| Оптическое исследование взаимодействия наночастиц золота с<br>лизосомом при изменении кислотности среды .....                                                                                                                      | 191 |
| Изучение влияния лазерного пробоя на свойства двух модельных белков<br>при добавлении к ним металлических наночастиц .....                                                                                                         | 194 |
| Оптические методы в задаче идентификации микроорганизмов.....                                                                                                                                                                      | 196 |
| Биофизические аспекты повышения продуктивности растений при<br>выращивании под нанокompозитными фотоконверсионными материалами<br>.....                                                                                            | 198 |
| Контроль фотодинамической инактивации патогенной микрофлоры с<br>помощью нанофотосенсибилизаторов .....                                                                                                                            | 201 |
| Эффективное возбуждение и регистрация единичных флуоресцентных<br>молекул в волноводе нулевой моды (ZMW) .....                                                                                                                     | 204 |
| Цитотоксичность диэлектрических наночастиц на основе диоксида<br>циркония и их возможное применение в медицине .....                                                                                                               | 207 |
| Управление бионическим протезом на основе датчиков<br>электромиограммы .....                                                                                                                                                       | 210 |
| Получение водных коллоидных растворов на основе наночастиц<br>моноклинного фосфата лантана, активированных ионами празеодима, и<br>их сочетанный эффект под действием рентгеновского излучения на<br>примере <i>in vitro</i> ..... | 213 |
| Дифференциальная диагностика плоскоклеточной карциномы кожи <i>in</i><br><i>vitro</i> методом спектроскопии комбинационного рассеяния света.....                                                                                   | 216 |
| РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА.....                                                                                                                                                                                                        | 218 |
| Характеристики шумового поля ветрового волнения в мелководном<br>неоднородном волноводе в области перехода от акустически мягкого к<br>жесткому дну .....                                                                          | 218 |
| Особенности измерения групповой скорости продольных ультразвуковых<br>волн в тонких стальных конструкциях .....                                                                                                                    | 221 |
| АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ .....                                                                                                                                                                                                 | 224 |



# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

## Лазерный синтез наночастиц бора для бор-нейтронозахватной терапии

**Айыыжы К.О., Бармина Е.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [aiyyzhy@phystech.edu](mailto:aiyyzhy@phystech.edu)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-8-9

Бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ) является одним из наиболее привлекательных методов лечения онкологических заболеваний, эффективность которой может быть повышена за счёт использования наночастиц (НЧ) бора [1–2]. Однако получение биосовместимых химически чистых НЧ с узким распределением по размерам и высоким содержанием бора по-прежнему представляет собой серьёзную проблему. В настоящей работе мы изучаем синтез НЧ элементарного бора методом импульсной лазерной фрагментации в жидкости промышленных порошков бора (марка А, марка Б и бор, обогащённый изотопом  $^{10}\text{B}$ ). В качестве источника лазерного излучения во всех экспериментах был использован твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 1064 нм, длительностью импульса 10 нс, частотой следования импульсов 10 кГц и энергией импульса 1 мДж. В качестве рабочей жидкости был использован изопропиловый спирт.

Анализ рентгенограмм показывает, что микропорошки бора марки А и бора, обогащенного изотопом  $^{10}\text{B}$ , являются аморфными, марки Б — кристаллическими. Изотопный состав, измеренный на вторично-ионном масс-спектрометре микропорошков бора марки А, марки Б и бора, обогащённого изотопом  $^{10}\text{B}$ , показывает содержание  $^{10}\text{B}$  19,2 %, 17,5 % и 85,1% соответственно. Лазерная фрагментация микропорошков бора приводит к образованию сферических НЧ. Максимумы распределений по размерам, полученных с помощью дисковой центрифуги CPS 24000, находились в диапазоне 5–100 нм для НЧ марки А и 10–40 нм для НЧ марки Б. Максимум распределения по размерам для НЧ бора, обогащенных изотопом  $^{10}\text{B}$ , полученного методом динамического рассеяния света, находился в диапазоне 10–100 нм. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждают данные, полученные с

помощью дисковой центрифуги и динамического светорассеяния. Элементный анализ методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показывает высокую чистоту НЧ бора марки А и НЧ бора, обогащённых изотопом  $^{10}\text{B}$  (содержание бора 99,1 %), а НЧ бора марки Б содержат бор в количестве 91,5 %. Полученные НЧ бора были функционализированы полимером полиэтиленгликоля для улучшения коллоидной стабильности и биосовместимости. Использование полученных НЧ бора в БНЗТ привело к существенному увеличению гибели раковых клеток [3].

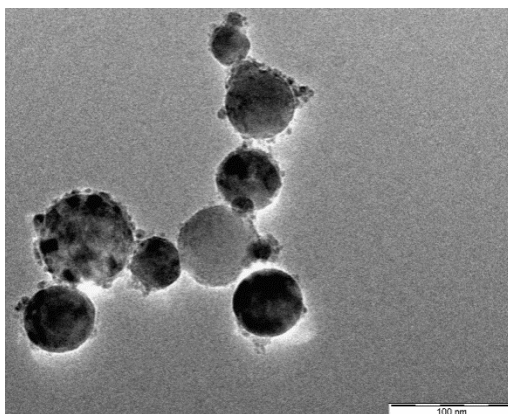


Рис. 1. Изображение наночастиц бора после лазерной фрагментации в изопропанол в течение 120 мин, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-62-00018.

1. Barth R.F., Soloway A.H., Fairchild R.G., Scientific American, 1990, **263**, 100–107.
2. Torresan V., Guadagnini A., Badocco D., et al., Advanced Healthcare Materials, 2021, **10**(6), 2001632.
3. Zavestovskaya I.N., Kasatova A.I., Kasatov D.A., et al., International Journal of Molecular Sciences, 2023, **24**, 17088.

**Исследование волновых механизмов  
при формировании периодических структур  
с помощью пикосекундной лазерной абляции металлов в воздухе**

**Антипов Д.А., Бруславский И.О., Чижов П.А., Ушаков А.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [antipov.dima.99@mail.ru](mailto:antipov.dima.99@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-10-11

Для накопления экспериментальных данных, которые лягут в основу теоретической модели, описывающей свойства мелкомасштабных периодических структур, необходимо параметрически исследовать процесс самостоятельного формирования мелкомасштабных периодических структур (МПС), а также исследовать их сосуществование с другими типами структур, такими как поверхностные периодические структуры (ППС), самоорганизующиеся наноструктуры (СОНС) и микроструктуры [1–2].

В докладе представлены новые исследования по созданию иерархических ППС и МПС на поверхности твёрдых тел при их субнаносекундной лазерной абляции в воздухе. Описание процесса формирования периодических наноструктур основано на теории волновых процессов в материалах. Мы обнаружили, что термокапиллярная неустойчивость в расплавленном слое на поверхности приводит к синтезу МПС. Сопутствующее формирование СОНС на МПС и ППС изучают в отношении параметров лазера и материала [3–4]. В наших экспериментах мы используем два типа лазерных источников с частотой повторения импульсов 1 кГц. Первый — YAG:Nd лазер с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 30 пс и энергией в импульсе 5000 мкДж. Второй — Yb:fiber fs-laser с длиной волны 1030 нм, длительностью импульса 6 пс и энергией в импульсе 40 мкДж. В качестве мишеней для эксперимента были использованы полированные Ti и нержавеющая сталь. Анализ изображений со сканирующего электронного микроскопа облученной поверхности (Mira TESCAN) показывает, что плотность энергии и количество импульсов в точку являются определяющими факторами для существования МПС отдельно от ППС. Увеличение числа импульсов в точку от 26 до 38

приводит к тому, что МПС И ППС могут сосуществовать ортогонально друг другу с периодом от 10 до 1000 нм (см. рис. 1).

Полученные данные лягут в основу теоретического моделирования МПС на основе капиллярно-волнового механизма.

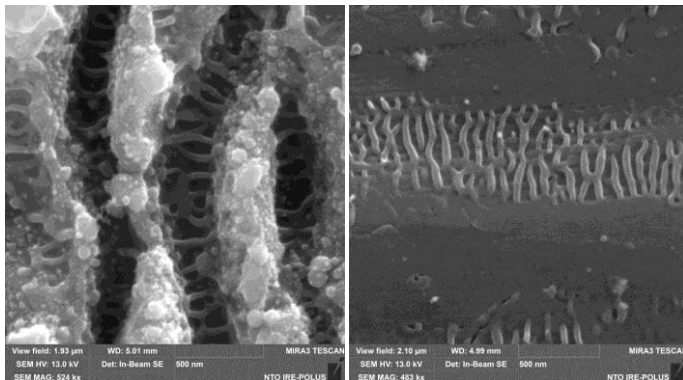


Рис. 1. Вид поверхности мишеней после воздействия в воздухе лазерным излучением Yb: fiber-источника с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 6 пс. Слева – титан, плотность энергии лазерного излучения 0,179 Дж/см<sup>2</sup>, число импульсов в точку —37, справа — нержавеющая сталь, плотность энергии лазерного излучения 0,214 Дж/см<sup>2</sup>, число импульсов в точку — 23.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.ф.-м.н Барминой Е.В. и к.ф.-м.н. Симакину А.В. за помощь в экспериментах. Работа была выполнена в рамках темы госзадания проекта "Квант" (сильно коррелированные и низкоразмерные электронные системы и квантовые материалы) (FFWF-2023-0004).

1. Kirichenko N.A., Barmina E.V., Shafееv G.A., Physics of Wave Phenomena. 2018, **26**(4), 264–273.
2. Kuleshov S. and Kobtsev V.D., Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2020, **56**(5), 566–575.
3. Reif J., Nanomaterials. 2023, **13**, 379.
4. Bonse J., & Gräf S., Maxwell meets, Laser & Photonics Reviews. 2020, **14**(10), 2000215.

## Твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой на керамике $Y_2O_3:Tm$

**Арискин А.О., Жамков А.М.**

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

*E-mail: [alejandro.ariskin@yandex.ru](mailto:alejandro.ariskin@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-12-14

Материалы на основе полуторных оксидов, легированных редкоземельными ионами, находят широкое применение в качестве активных сред твердотельных лазеров [1]. Это обусловлено высокими значениями теплопроводности и механических характеристик данных материалов. Также они характеризуются высокими значениями пиковых сечений поглощения и вынужденного излучения редкоземельных ионов-активаторов. Однако из-за высокой температуры плавления (выше 2438 °С), получение их в виде монокристаллов затруднено. Поэтому разработка лазерных керамик на основе полуторных оксидов, легированных редкоземельными ионами, представляет значительный интерес.

Впервые о лазерной генерации на переходе  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  при полупроводниковой накачке в керамике  $Y_2O_3:Tm$  ( $c_{Tm}=1,7$  ат.%), полученной во Фрязинском филиале ИРЭ РАН, было сообщено в работе [2]. В дальнейшем работы по совершенствованию технологии получения керамики  $Y_2O_3:Tm$  были продолжены, и в настоящем докладе представлены результаты генерационного эксперимента по получению двухмикронной лазерной генерации на керамике  $Y_2O_3:Tm$  ( $c_{Tm}=3$  ат.%), изготовленной во Фрязинском филиале ИРЭ РАН Балашовым В.В.

Для проведения генерационного эксперимента из образца керамики  $Y_2O_3:Tm$  ( $c_{Tm}=3$  ат.%) был вырезан активный элемент в виде параллелепипеда с размерами  $3 \times 3 \times 15$  мм. Для проверки оптического качества активного элемента были получены изображения его поверхностей и внутренних областей с использованием микроскопа высокого оптического разрешения Carl Zeiss Axio Imager Z2 (см. рис. 1).

Как видно из рисунка, поры в активном элементе из керамики  $Y_2O_3:Tm$  в большей степени сосредоточены вблизи поверхности активного элемента.

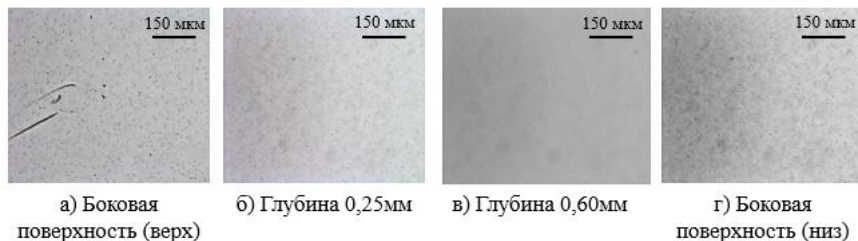


Рис. 1. Изображения боковых поверхностей и внутренних областей на расстояниях 0,25 и 0,6 мм от верхней поверхности активного элемента из керамики  $Y_2O_3:Tm$ .

Оптическая схема лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$  показана на рис. 2. Резонатор лазера образован входным плоским зеркалом и выходным сферическим зеркалом с радиусом кривизны 150 мм. Коэффициенты отражения и пропускания входного зеркала в спектральном диапазоне 1,9–2,1 мкм соответствовали  $R > 99\%$  и  $T < 0,5\%$ . Коэффициент пропускания  $T$  выходного зеркала на длине волны  $\lambda = 1,95$  мкм составляет  $\sim 30\%$  и около  $3\%$  — в спектральном диапазоне 2,0–2,1 мкм. В качестве источника накачки была использована линейка лазерных диодов мощностью 45 Вт с длиной волны излучения 793 нм. Излучение накачки фокусировалось в активный элемент с помощью четырехлинзового объектива в пятно диаметром около 500 мкм.

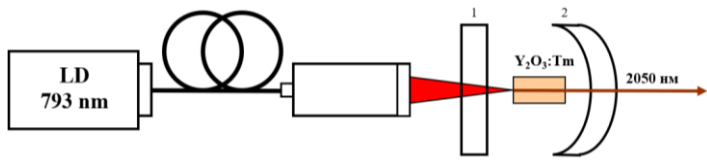


Рис. 2. Оптическая схема лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$ .

На переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в керамике  $Y_2O_3:Tm$  была получена лазерная генерация с длиной волны 2073 нм. Спектр лазерной генерации на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в керамике  $Y_2O_3:Tm$  показан на рис. 3.

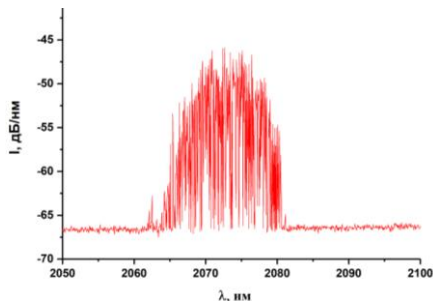


Рис. 3. Спектр генерации на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в керамике  $Y_2O_3:Tm$ .

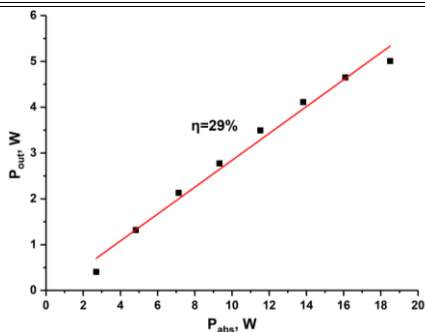


Рис. 4. Зависимость выходной мощности лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$  от мощности накачки, поглощённой в активном элементе.

Зависимость выходной мощности излучения лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$  от мощности накачки, поглощенной в активном элементе, приведена на рис. 4. Дифференциальный КПД лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$  составил 29 %.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Рябочкиной П.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов и к.ф.-м.н. Герасимову М.В. за помощь в проведении экспериментов с использованием микроскопа Carl Zeiss Axio Imager Z2 Vario.

1. Strange H., Petermann K., Huber G. and Duczynski E.W., Appl. Phys. B. 1989, **49**, 269–273.
2. Рябочкина П.А., Чабушкин А.Н., Копылов Ю.Л. и др., Квантовая электроника. 2016, **46**(7), 597–600.

## Дефекты структуры оптических преформ и изготовленных из них кварцевых оптических волокон

**Бузаева Е.М.<sup>1</sup>, Ларина Н.А.<sup>1</sup>, Буралкин М.В.<sup>2</sup>, Таниякин Д.А.<sup>2</sup>**

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

*2- АО «Оптиковолокonné системы», Саранск*

*E-mail: [katyabuzaeva@yandex.ru](mailto:katyabuzaeva@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-15-16

Одной из причин снижения прочностных характеристик оптических волокон в процессах перемотки и эксплуатации является наличие большого количества дефектов структуры. Поэтому важной задачей представляется исследование дефектной структуры оптических волокон, а также преформ, из которых они изготовлены.

В оптических световодах присутствуют дефекты, связанные с наличием неконтролируемых примесей, а также собственные дефекты диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Образование собственных дефектов  $\text{SiO}_2$  обусловлено разрывом регулярных связей Si–O сетки кварцевого стекла [1–3]. Данные дефекты подразделяются на кислородо-дефицитные и кислородо-избыточные. Собственные дефекты возникают на этапах изготовления преформ и при вытяжке волокна [4–6].

Наличие собственных дефектов  $\text{SiO}_2$  в волоконных световодах можно зарегистрировать по возникновению в оптическом диапазоне длин волн широких полос люминесценции при различных способах возбуждения [7–8].

Целью настоящей работы являлось выявление дефектной структуры преформ различных производителей и изготовленных из них оптических волокон для снижения вероятности обрыва и улучшения их прочностных свойств. Для выявления дефектной структуры оптических световодов были использованы методы фотолюминесцентной спектроскопии.

Анализ полученных спектров люминесценции оптических волокон выявил наличие широких полос люминесценции в областях 550 и 620 нм. Данные полосы обусловлены наличием центров, индуцированных лазерным излучением, и центрами немостикового кислорода. Из сравнительного анализа относительных интенсивностей данных линий был сделан вывод об относительном



содержании этих дефектных центров в волокнах, произведенных из преформ различных производителей.

Сравнительный анализ был проведен для преформ. Выявлено наличие аналогичных широких полос в спектрах люминесценции. Установлено, что в области объёмных дефектов относительная интенсивность данных полос люминесценции возрастает.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Рябочкиной П.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Skuja L. et al., *Physica status solidi (c)*. 2005, **2**(1), 15–24.
2. Skuja L., *J. of Non-crystalline Solids*. 1998, **239**(1–3), 16–48.
3. Skuja L. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2012, **286**, 159–168.
4. Hibino Y., Hanafusa H., *J. Appl. Phys.* 1986, **60**(5), 1797–1801.
5. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F., *J. Appl. Phys.* 1985, **58**(3), 1356–1361.
6. Hanafusa H., Hibino Y., Yamamoto F., *Electronics Letters*. 1986, **22**(2), 106–108.
7. Salh R., *InTech*. 2011, 137–150.
8. Kucheyev S.O., Demos S.G., *Appl. Phys. Lett*, 2003, **82**(19), 3230–3232.

## **Подавление усиленного спонтанного излучения на 1030 нм в иттербиевом усилителе, излучающем на длине волны 976 нм**

**Давыдов Д.А., Алешкина С.С., Вельмискин В.В., Алышев С.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
Научно-исследовательский центр волоконной оптики имени Е.М. Дианова, Москва*

*E-mail: [walpurgis-nacht@mail.ru](mailto:walpurgis-nacht@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-17-19

На сегодняшний день волоконные Yb-лазеры, работающие в спектральной области 976 нм, представляют большой интерес в качестве потенциально мощных одномодовых источников накачки для лазеров на основе активных элементов, легированных ионами Er и Yb. Более широкий спектр применения открывается при удвоении (488–490 нм, замена Ag-лазерам) и учетверении (244–245 нм, замена эксимерным лазерам) частоты излучения таких лазеров. Однако достижение эффективной генерации на длине волны 976 нм в иттербиевом волокне является нетривиальной задачей из-за необходимости подавления усиленного спонтанного излучения (УСИ) вблизи 1030 нм. В связи с этим ранее была предложена простая конструкция волокна, основанная на добавлении поглощающих стержней в оболочку. Параметры стержней были подобраны специально для достижения резонансного взаимодействия между модами сердцевины и модами стержней, поглощающих на нежелательной длине волны [1, 2]. Теоретический и экспериментальный анализ показал, что положение «стоп-полосы» (положение резкого перехода от области низких потерь к области высоких потерь) в таких волокнах можно довольно точно контролировать путем изгиба волокна.

Исходя из этого, данная работа посвящена исследованию новой реализованной конструкции активного волокна, легированного ионами иттербия, созданной с целью повышения эффективности излучения в области 976 нм путем спектральной фильтрации УСИ в области 1030 нм за счет соответствующего изгиба волокна.

В рамках настоящего исследования наблюдали значительное увеличение выходной мощности в изготовленном волокне за счет эффективного подавления УСИ вблизи 1030 нм путем смещения стоп-полосы в область 1000–1100 нм благодаря соответствующему

изгибу волокна (см. рис. 1). В частности, практически всё излучение выше 1000 нм было подавлено (оптические потери на длине волны 1030 нм превысили 10 дБ/м) при диаметре изгиба менее 86,5 мм, хотя и с небольшим увеличением потерь ( $\sim 0,2$  дБ/м) на длине волны сигнала (см. рис. 1, вставка).

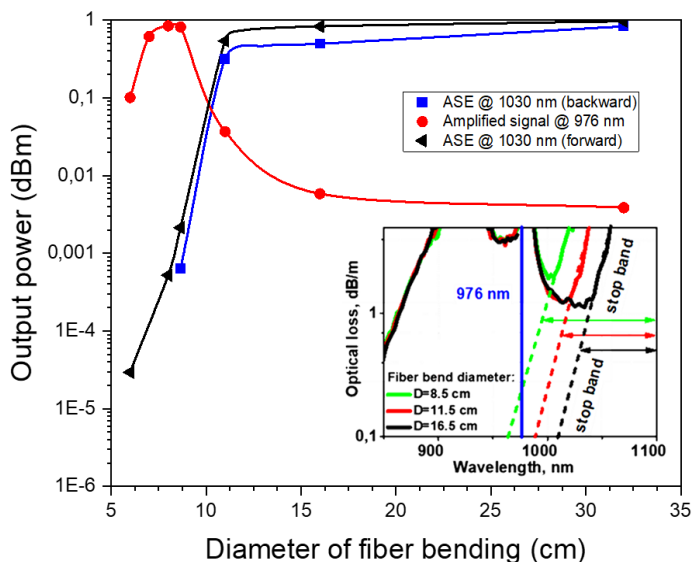


Рис. 1. Зависимость мощности усиленного сигнала на выходе из специального Yb-волокна длиной 20 м от диаметра изгиба волокна ( $13/92 \times 92$  мкм); вставка — потери по сердцевине волокна ( $13/92 \times 92$  мкм), намотанного на катушки разного диаметра.

Таким образом, специально разработанное волокно позволило увеличить оптимальную длину до 15 метров, что привело к максимальному усилению сигнала, по сравнению с 12,5 метрами для активного волокна без подавления УСИ. В целом, использование изогнутого волокна длиной 15 м и намотка на катушку диаметром 8 см позволяют увеличить выходную мощность примерно на 10–30 % во всём диапазоне тестируемых мощностей накачки. В то же время увеличение выходного сигнала невелико из-за небольшой разницы в длине. Результирующая эффективность преобразования мощности (ЭПМ) по-прежнему низка и составила приблизительно 10 %, что

является примерно идентичным результатом в случае измерения волокна без подавления УСИ.

Были выявлены два основных фактора, сильно ограничивающие максимально достижимую ЭПМ: избыточные потери на длине волны сигнала из-за сдвига края стоп-полосы в область  $<1$  мкм и избыточные потери на длине волны накачки из-за дополнительного поглощения, ассоциированного с ионами легирующей добавки стержней  $\text{Sm}^{3+}$ .

Авторы выражают благодарность научному руководителю Лихачеву М.Е., Исхаковой Л.Д., Бубнову М.М. и сотрудникам Института химии высокочистых веществ имени Г.Г. Девярых Российской академии наук (Яшкову М.В., Умникову А.А. и Липатову Д.С.) за постановку научной задачи, вытяжку специального волокна, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Aleshkina S., Kashaykina T., Yashkov M., et al. Opt. Lett. 2021, **46**, 1458–1461.
2. Aleshkina S., Yashkov M.; Salganskii M., et al. Journal of Lightwave Technology. 2022, **40**, 4848–4854

## Моделирование поляризационно-зависимого усиления в германо- и фосфоросиликатных висмутовых световодах

**Елопов А.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва*

*E-mail: [elopov@fo.gpi.ru](mailto:elopov@fo.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-20-22

Висмутовые волоконные усилители (ВВУ) привлекают большое внимание на протяжении последних десятилетий в связи с широким диапазоном длин волн (1,2–1,7 мкм), в котором они могут усиливать сигнал [1]. Однако, несмотря на появления серийных коммерческих ВВУ, ряд свойств остаётся изученным не до конца. Одним из них является поляризационно-зависимое усиление (ПЗУ), которое может влиять на характеристики лазерных устройств и работу волоконных линий связи [2]. Данный эффект достаточно изучен в эрбиевых волоконных усилителях (ЭВУ). Последние исследования показали, что ПЗУ проявляется более явно в ВВУ, чем в ЭВУ, в силу большего параметра анизотропии у висмутовых активных центров (ВАЦ), чем у ионов эрбия [3]. Для ПЗУ характерно различие в коэффициенте усиления для сигнала, плоскость поляризации которого параллельна и перпендикулярна поляризации накачки.

В рамках данной работы с целью лучшего прогнозирования поляризационных свойств усилителей проведено моделирование ПЗУ на основе общепринятой модели [4] с использованием таких характеристик ВАЦ, как параметр анизотропии [3], сечение поглощения и эмиссии [5, 6]. Базовые предпосылки данной модели следующие:

- i) сечения поглощения и эмиссии анизотропны и представимы в виде поверхности эллипса, характеризуемой параметром анизотропии;
- ii) все ВАЦ разбиваются на подгруппы, относительно плоскостей поляризации накачки и сигнала;
- iii) проводится расчёт вклада каждой подгруппы в поглощение и усиление;

iv) выполняется решение уравнений распространения для накачки, сигнала и усиленной спонтанной эмиссии для обоих компонент поляризации [4].

В рамках данной работы были рассчитаны зависимости доли возбужденных ВАЦ разных подгрупп в зависимости от углов между основной осью эллипса, характеризующего сечения, и плоскостью поляризации накачки и сигнала (рис. 1 а).

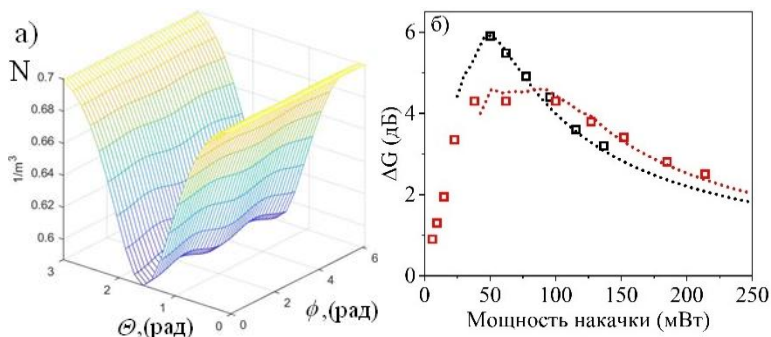


Рис. 1. а) Зависимость доли возбужденных ВАЦ от ориентации подгруппы. б) Разность коэффициентов усиления для ВВУ на базе германо- и фосфоросиликатного (чёрный) и фосфоросиликатного световода (красный) в зависимости от мощности накачки в спектральном пике усиления: экспериментальная (символы) и смоделированные (пунктирные линии) зависимости.

Для проверки правильности работы модели были промоделированы два ВВУ с поддержкой поляризации на основе германо- и фосфоросиликатных волокон. Германо- и фосфоросиликатный усилитель был собран с встречной накачкой и длиной активного волокна 52 м. В то время как фосфоросиликатный усилитель был сконструирован с двухсторонней накачкой и длиной активного волокна 115 м. На основе решений уравнений распространения [4] были получены расчётные зависимости разности коэффициентов усиления от мощности накачки, которые хорошо согласуются с экспериментальными (рис. 1 б).

Данная работа позволит моделировать поляризационные свойства ВВУ и обеспечит лучшее прогнозирование работы устройств.

1. Dianov E.M J. Light. Technol. 2013, **31**, 681–688.
2. Lichtmann E. Electron. Lett. 1993, **29**, 1969–1971.

3. Elopov A.V., Riumkin K.E., Afanasiev F.V. et al., Photonics. 2023, **10**, 860.
4. Wysocki P., Mazurczyk V. J. Light. Technol. 1996, **14**, 572–584.
5. Alyshev S., Vakhrushev A., Khegai A., et al., Photonics Res. 2024, **12**, 260–270.
6. Khegai A., Firstov S., Riumkin K., et al., Opt. Express. 2020, **28**, 29335–29344.

## Исследование параметра дисперсии групповой скорости в композитном Er/Yb активном волокне

**Зверев А.Д.<sup>1</sup>, Красновская К.А.<sup>2</sup>, Камынин В.А.<sup>1</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

*E-mail: [izverevad@gmail.com](mailto:izverevad@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-23-25

Волоконные источники ультракоротких импульсов имеют широкое применение в науке и технике. Такие устройства применяют в обработке материалов [1], микроскопии [2], они являются элементами источников суперконтинуума [3] и терагерцового излучения [4]. При их проектировании очень важны параметры нелинейности и дисперсии составных компонент. Они значительно влияют на спектральные, временные и мощностные характеристики выходного излучения. Измерение параметров дисперсии пассивного волокна возможно с помощью фазовых и интерференционных методов. Но стандартные методы плохо подходят для оценки дисперсии активных волокон с высокой концентрацией из-за сильного поглощения. В нашей работе была проведена оценка параметра дисперсии композитного активного волокна, сильно легированного комплексом активных ионов Er/Yb и помещённого внутрь резонатора лазера, работающего в режиме генерации оптических солитонов. При солитонной генерации в спектре излучения присутствуют пики Келли (рис. 1(б)), положение которых зависит от параметров дисперсии резонатора [5]. Таким образом, анализ спектров позволяет определить дисперсию составных частей волоконного лазера, в том числе и композитного волокна.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1(а). При подстройке контроллера поляризации и регулировании мощности накачки нам удавалось получить стабильные режимы генерации солитонов с характерно выраженными пиками Келли (рис. 1 (б)).



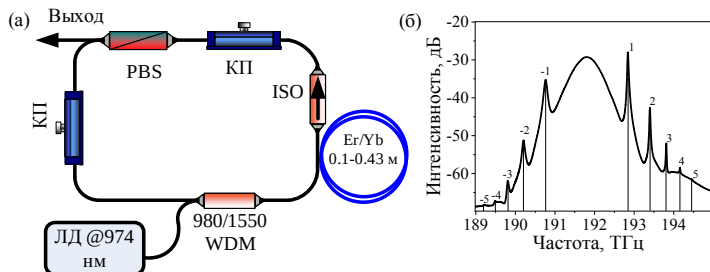


Рис. 1. Эрбиевый волоконный лазер, работающий в режиме генерации солитонов (а). ЛД – лазерный диод; ISO – оптический изолятор, PBS – поляризационный делитель, КП – контроллер поляризации, WDM – оптический мультиплексор.

Спектр сигнала с пронумерованными пиками Келли (б).

Длину активного волокна варьировали в диапазоне от 0,1 до 0,43 м для возможности проведения измерений в широком спектральном диапазоне от 1542 до 1564 нм. Анализ положения пиков Келли при стабильных режимах работы лазера позволил получить информацию о дисперсии резонатора и вычислить параметр дисперсии групповых скоростей для композитного активного волокна (рис. 2).

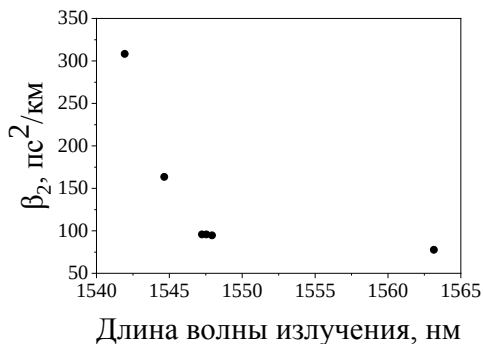


Рис. 2. Параметр дисперсии групповой скорости активного композитного волокна.

Таким образом в данной работе представлены результаты измерения дисперсии композитного волокна в диапазоне длин волн от 1542 до 1564 нм. Значение параметра дисперсии варьировалось от

308 до  $50 \text{ пс}^2/\text{км}$ . Высокие показатели дисперсности обусловлены геометрией волокна и его составом, а также высокой концентрацией легирующих примесей.

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

1. H. Kalaycıoğlu, P. Elahi et al., IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2017, **24**(3), 1–12.
2. E.O. Potma, D.J. Jones, J.-X. Cheng, et al., Opt. Lett. 2002, **27**, 1168–1170.
3. Sobon, Grzegorz, et al., Optical Materials Express. 2014, **4**(1), 7–15.
4. A. Lohner, P. Kruck, and W.W. Rühle, Appl. Phys. B. 1994, **59**, 211–213.
5. Kelly S.M.J. XVIII International Quantum Electronics Conference (paper TuH3). Technical Digest Series (Optica Publishing Group, June 1992).

## Исследование дымовых шлейфов в тропосфере с использованием 5-канального флуоресцентного лидара

**Касьяник Н.И.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [kasnik46@yandex.ru](mailto:kasnik46@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-26-28

Частицы дыма, возникающие в процессе лесных пожаров, являются одной из основных компонент атмосферного аэрозоля. Высокие температуры в областях горения обеспечивают выброс дыма в тропосферу. Дымовые шлейфы поглощают солнечную радиацию, разогреваются, поднимаются до нижней стратосферы и переносятся на большие расстояния, совершая до нескольких оборотов вокруг земного шара. Так шлейфы дыма, сформированные над Северной Америкой, могут наблюдаться над Москвой в широком диапазоне высот: от пограничного слоя до тропопаузы (~12 км). Частицы дыма оказывают влияние на динамику формирования жидких и ледяных облаков, поэтому процессы переноса дыма и его оптические свойства активно исследовали в последнее десятилетие с использованием мнововолновых лидаров.

Однако дымовые шлейфы не всегда могут быть надёжно идентифицированы с использованием традиционных Ми-рамановских лидаров. В частности, проблематичным оказывается разделение дыма и городского аэрозоля, поскольку оба типа частиц обладают близкими характеристиками. В цикле работ, проводимых в ЦФП ИОФ РАН с 2020 года было продемонстрировано, что частицы дыма обладают высоким сечением флуоресценции и позволяют надёжно детектировать слои дыма на высотах свыше 12 км.

Начиная с 2022 года в ЦФП работает пятиканальный флуоресцентный лидар, который позволяет оценивать спектр флуоресценции аэрозоля [1]. Лидар использует YAG:Nd-лазер с энергией импульса 80 мДж на длине волны 355 нм при частоте повторения 20 Гц. Сигнал флуоресценции собирают ньютоновским телескопом с апертурой 40 см. Центральные длины волн и ширины полос пропускания каналов составляют 438/29, 472/32, 513/29, 560/40 и 614/54 нм. 2023 год оказался рекордным по количеству лесных пожаров, и флуоресцентный лидар в период с апреля по сентябрь был

использован для регулярных измерений вертикальных распределений параметров частиц. Лидар позволяет измерять коэффициент обратного рассеяния на длине волны 355 нм ( $\beta_{355}$ ) и коэффициенты «обратного флуоресцентного рассеяния» на пяти длинах волн ( $B_{348}$ ,  $B_{472}$ ,  $B_{513}$ ,  $B_{560}$ ,  $B_{614}$ ). Для описания флуоресцентных свойств частиц мы также используем величину «эффективность флуоресценции» ( $G_i$ ), которая является отношением коэффициента обратного флуоресцентного рассеяния  $B_i$  к  $\beta_{355}$ .

Измерения, проведённые в ЦФП в течение 2023 года, позволили определить усреднённые спектры, соответствующие городскому аэрозолю, дыму в нижней тропосфере и дыму в верхней тропосфере. В то время как флуоресценция городского аэрозоля уменьшается с увеличением длины волны, пик флуоресценции дыма смещается в сторону каналов 513 нм для нижней тропосферы и 560 нм для верхней тропосферы. Поэтому выбор эталонных спектров дыма и городского аэрозоля предоставляет возможность измерения вкладов этих частиц в полный сигнал флуоресценции ( $B_{438}^U, B_{438}^S$ ).

На рис. 1 и 2 представлены результаты измерений атмосферного аэрозоля, проведённые в ночь с 25 на 26 сентября 2023 года. На цветных картах видна граница между дымом и городским аэрозолем. На рис. 2 также показано, что дым и городской аэрозоль хорошо разделяются, а их смешивание практически отсутствует.

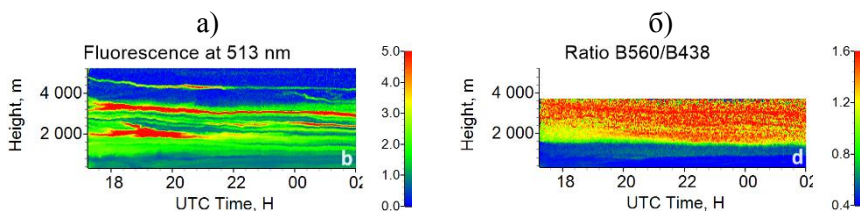


Рис. 1. Измеренные ночью с 25 на 26 сентября 2023 года пространственно-временные распределения

- (а) коэффициента обратного рассеяния флуоресценции  $B_{513}$  ( $\text{Тм}^{-1}\text{ср}^{-1}\text{нм}^{-1}$ ),  
(б) отношение  $B_{560}/B_{438}$ .

Приведенные результаты подтверждают высокую эффективность флуоресцентной методики, и расчёты спектров флуоресценции будут в дальнейшем использованы для анализа временной эволюции параметров.

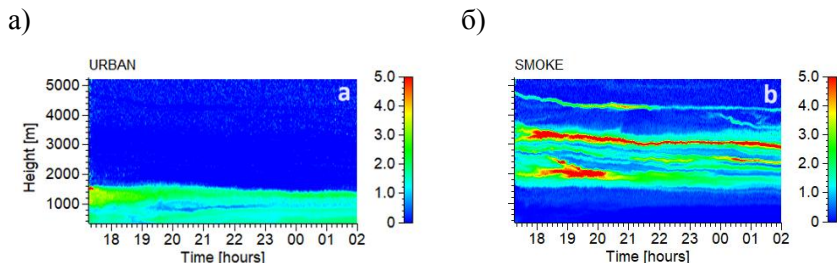


Рис. 2. Обратное рассеяние флуоресценции (в  $\text{Tm}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ ) на длине волны 438 нм, приписываемое городским частицам ( $B_{438}^U$ ) (а) и дыму ( $B_{438}^S$ ) (б). Наблюдения 25-26 сентября 2023 г.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Веселовскому И.А. и к.ф.-м.н. Коренскому М.Ю. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Veselovskii I., Kasianik N., Korenskii M., et al., Atmos. Meas. Tech. 2023, **16**, 2055–2065. <https://doi.org/10.5194/amt-16-2055-2023>.

## Гелий-ксеноновый газоразрядный волоконный лазер

**Комиссаров Д.Г., Вельмискин В.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва*

E-mail: [komdq@fo.gpi.ru](mailto:komdq@fo.gpi.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-29-31

Недавние работы, посвящённые газоразрядному волоконному лазеру (ГРВЛ) [1] на основе кварцевого волокна с полый сердцевиной, открывают возможности для разработки компактных волоконных лазеров, генерирующих в УФ-, ИК- и среднем ИК-диапазонах.

И хотя ранее уже были продемонстрированы газовые волоконные лазеры с оптической накачкой, разработка лазеров на основе полых световодов с накачкой газовым разрядом была недостижимой целью длительное время. На пути к этой цели были испробованы различные схемы накачки, позволяющие осуществлять поджиг и поддерживать стабильное горение разряда внутри полый сердцевины диаметром  $\sim 100$  мкм. Среди этих схем использовали накачку постоянным током [2, 3], а также ВЧ-накачку [4] и СВЧ-накачку [5]. Несмотря на то, что с накачкой 40-кВ разрядом постоянного тока удалось продемонстрировать усиление [2, 3], только недавно [1] была получена генерация с использованием СВЧ-разряда в конфигурации с щелевой антенной [5].

В настоящей работе мы изучаем влияние на работу газоразрядного волоконного лазера, генерирующего на длине волны 2,03 мкм атома ксенона, таких параметров He-Xe смеси, как давление и молярная доля гелия и ксенона.

Накачку ГРВЛ осуществляли СВЧ-излучением с частотой 2,45 ГГц, передаваемым в 32-сантиметровую активную зону полого волокна общей длиной 1,2 м с использованием конфигурации с щелевой антенной [1, 5]. Длительность микроволновых импульсов составляла 20–80 мкс, а частота повторения была 400 Гц. Средняя мощность микроволнового излучения была около 20 Вт.

Выходная мощность ГРВЛ, как было обнаружено, сильно зависела от молярной доли Хе. Изменяя молярную долю Хе в пределах 0,15–10 % при фиксированном общем давлении 120 Торр, удалось добиться максимальной импульсной выходной мощности

2 мВт при содержании Хе 1 %. При более низком содержании Хе мощность генерации падает из-за того, что смесь содержит мало активных атомов Хе. Когда концентрация ксенона превышает 1 %, тоже наблюдается снижение мощности генерации. Вероятными причинами такого снижения могут быть повышенная частота тушащих верхний лазерный уровень столкновений атомов Хе с другими частицами или изменение содержания гелия, который влияет на энергию электронов в разряде.

При сохранении оптимального значения молярной доли ксенона (1 %) измеряли зависимость выходной мощности от общего давления в диапазоне 50–300 Торр. Выходная оставалась практически неизменной для давлений 120–170 Торр, достигая наибольшего значения (2 мВт) при давлении ~120 Торр.

Была изучена зависимость формы импульса генерации от общего давления смеси. Как видно на рис. 1, выходная мощность ГРВЛ остаётся постоянной в импульсе, если давление газовой смеси ниже ~150 Торр. Однако, наблюдалось затухание оптической мощности при более высоких давлениях, приводящее к полному прекращению лазерной генерации при давлениях ~300 Торр. Более детальное обсуждение этого явления будет представлено на конференции.

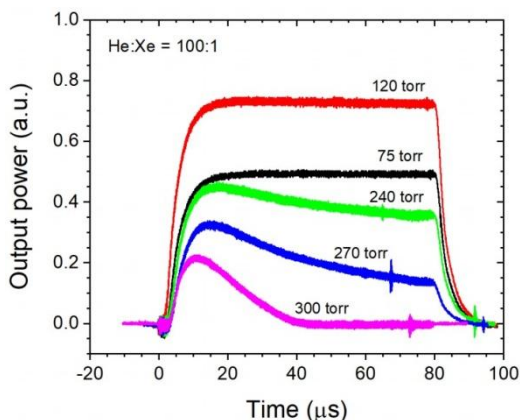


Рис. 1. Временные профили выходных лазерных импульсов при разных давлениях смеси He-Xe (100:1)

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Гладышеву А.В., и д.ф.-м.н. Буфетову И.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов. Отдельная благодарность к.ф.-м.н. Косолапову А.Ф. за изготовление световода, а также к.ф.-м.н. Минееву А.П. и Нефёдову С.М. за возможность пользоваться оборудованием и за дельные советы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-19-00542, <https://rscf.ru/project/22-19-00542/>.

1. Gladyshev A.V., Komissarov D.G., Nefedov S.M. et al., Bull. Lebedev Phys. Inst. 2023, **50**, 403–408.
2. Bateman S.A., Belardi W., F. Yu, et al., CLEO, San Jose, CA, USA. 2014, Art. no. STh5C.10.
3. Love A.L., Bateman S.A., Belardi W., et al., CLEO, San Jose, CA, USA. 2015, Art. no. SF2F.4.
4. Heidt A.M., Bradley T., Wheeler N., et al., Advanced Photonics, Zurich, Switzerland. 2018, Art. no. SoTh2H.2.
5. Gladyshev A., Nefedov S., Kolyadin A., et al., Photonics. 2022, **9**(10), Art. no. 752.



**Прямая лазерная запись  
спиральной волноведущей брэгговской решётки  
в иттербий-эрбиевом фосфатном стекле**

**Лихов В.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва*

*E-mail: [vladislav-likhov@fo.gpi.ru](mailto:vladislav-likhov@fo.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-32-34

В последние годы все большее внимание привлекают вихревые пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ). Волновой фронт таких пучков имеет спиральную форму, а интенсивность в центре пучка равна нулю. Благодаря фазовым характеристикам ОУМ-пучков, они находят применения в области оптической связи и манипулирования частицами.

Возможность генерации волноводных вихревых мод с помощью спиральных структур, записанных пучком фемтосекундного лазера, впервые была показана в кристалле YAG:Nd [1]. Подобный подход обеспечивает возможность получения оптических вихрей непосредственно в волоконных световодах без использования объёмной оптики. Кроме того, это открывает перспективу создания вихревого лазера с использованием брэгговских спиральных структур в качестве зеркал резонатора. Легирование стеклянной матрицы ионом эрбия позволит получить длину волны генерации, совместимую с телекоммуникационным С-диапазоном ( $\sim 1,55$  мкм).

Эксперименты производили в образце иттербий-эрбиевого фосфатного стекла марки ЛГС-ДЕ, синтезированного в ИРЭ РАН, с концентрацией ионов эрбия  $8,5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  [2].

Перед записью волновода в том же образце были записаны прямые треки, и измерено изменение показателя преломления. Для записи как треков, так и волновода был использован лазер с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 180 фс. Пучок фокусировали в объёме образца объективом с числовой апертурой 0,45 с расположенной перед объективом спектроскопической щелью с просветом 400 мкм, обуславливающей равномерность спирального трека по азимутальному углу [3].

Минимальная энергия импульса, при которой происходит модификация стекла составила 130 нДж в случае без щели (с сигарообразной перетяжкой) и около 1,4 мкДж в случае со щелью (чечевицеобразная перетяжка). Это можно объяснить тем, что во втором случае энергия импульса распределяется по большему объёму, что существенно для высоконелинейного процесса прямой лазерной записи.

Контраст показателя преломления в фосфатном стекле зависит от энергии импульса и составляет  $+2,5 \times 10^{-5}$  при энергии импульса 1,9 мкДж и примерно  $-9,0 \times 10^{-4}$  при энергии 3,8 мкДж. Эффект инверсии показателя преломления ранее был описан в литературе для боросиликатного стекла BK7 [4].

При записи волновода энергия импульса была равна 2 мкДж, частота следования импульсов 60 Гц, а скорость записи — один виток в секунду, что соответствует перекрытию импульсов приблизительно 5 импульсов на точку. Запись производилась на глубине 200 мкм. Длина волноводов составляла 4,8 мм, средний диаметр 40 мкм, а шаг спирали составил 1,6 мкм. Вид волновода с торца приведён на рис. 1а.

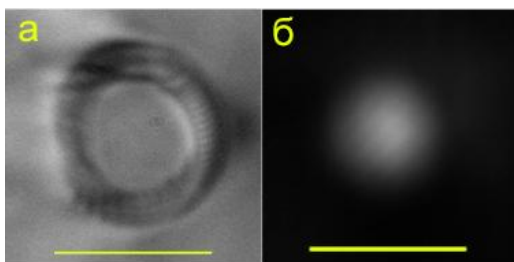


Рис. 1. а — микроснимок волновода с торца, б — мода волновода на длине волны 1550 нм. Масштабная линия 40 мкм.

Для характеристики волноводов использовали полупроводниковый одночастотный лазер с перестраиваемой длиной волны (диапазон 1480–1620 нм). Изображение моды волновода приведено на рис. 1б. Диаметр моды равен 35 мкм.

Спектр пропускания волновода, нормированный на пропускание образца (учтены полосы поглощения эрбия и

френелевское отражение), приведён на рис. 2. Резонансный провал расположен на длине волны 1617 нм и имеет глубину порядка –20 дБ.

Спиральная волноведущая брэгговская решётка, записанная в иттербий-эрбиевом фосфатном стекле, в перспективе может быть стать основой для компактного вихревого лазера. В докладе будут представлены результаты исследования отражённого волноводом пучка.

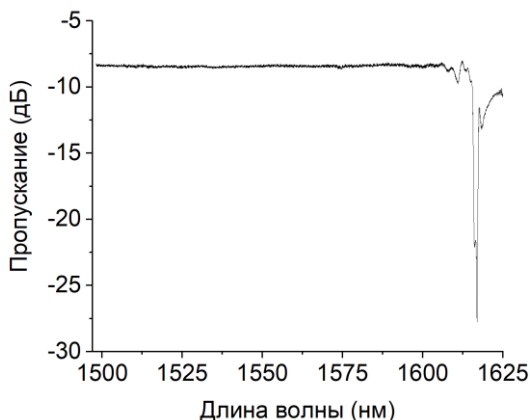


Рис. 2. Зависимость пропускания волновода от длины волны.

Автор выражает благодарность научному руководителю Охримчуку А.Г. за плодотворные консультации и помощь в подготовке публикации, а также Садовскому П.И. за подготовку образцов фосфатного стекла.

1. Okhrimchuk A.G. et al., Journal of Lightwave Technology. 2021, **40**(8), 2481–2488.
2. Бышевская-Конопко Л.О. и др. Квантовая электроника. 2004, **34**(9), 809–811.
3. Likhov V. et al., Optics Letters. 2024, **49**(5), 1217–1220.
4. Mishchik K. et al., Optical Materials Express. 2013, **3**(1), 67–85.

## Мультистабильность в системе связанных оптических микрорезонаторов с термо-оптической нелинейностью

**Марисова М.П., Андрианов А.В., Анашкина Е.А.**

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,  
Нижний Новгород*

E-mail: [marisova.mariya@rambler.ru](mailto:marisova.mariya@rambler.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-35-36

Оптические диэлектрические микрорезонаторы привлекают особое внимание исследователей в последнее время. Термо-оптическая нелинейность — один из наиболее распространённых типов нелинейности в таких системах: из-за частичного поглощения накачки микрорезонатор нагревается, что приводит к сдвигу собственных частот, вызванному как тепловым расширением, так и  $dn/dT$ . Системы из нескольких связанных микрорезонаторов обладают дополнительными степенями свободы, и подробное изучение нелинейных эффектов в таких системах также представляет интерес [1]. В данной работе было проведено исследование стационарных и нестационарных эффектов в системе из двух связанных микрорезонаторов с термо-оптической нелинейностью.

Разработанная теоретическая модель основана на теории связанных мод. Предполагалось, что излучение вводят в систему несимметрично, с помощью волоконной перетяжки, расположенной около одного из двух микрорезонаторов. Диаметр микрорезонаторов 50 мкм, материал — кварцевое стекло. Оптические характеристики взаимодействующих парциальных фундаментальных мод (частоты  $f_{1,2}$ , добротность, коэффициент связи) были получены из конечно-элементного моделирования, учитывающего геометрию системы, а термо-оптические характеристики — с помощью ранее разработанных моделей для одиночных резонаторов [2].

Получено, что в системе возможны от 1 до 9 стационарных состояний (см. рис. 1), из которых не более 4 являются устойчивыми. Образованию новых пар стационарных состояний при изменении параметров накачки соответствуют бифуркации типа «седло — узел» (линии и маркеры красного цвета на рис. 1). Также были найдены бифуркации Андронова-Хопфа ( $A_{1-3}$  на рис. 1). Бифуркации  $A_{2,3}$  могут приводить к установлению автоколебательных режимов.

Показано, что характеристиками автоколебаний можно управлять с помощью частотной отстройки накачки: удаление от точек  $A_{2,3}$  приводит к росту периода и амплитуды колебаний. При увеличении мощности накачки в области между  $A_2$  и  $A_3$  появляется пара гомоклинических бифуркаций  $H_{1,2}$  (бифуркации петли сепаратрисы седла), приводящих к разрушению автоколебательных режимов в области между  $H_1$  и  $H_2$ . Помимо случая  $f_1 = f_2$ , показанного на рис. 1, был также рассмотрен случай наличия малой межмодовой отстройки.

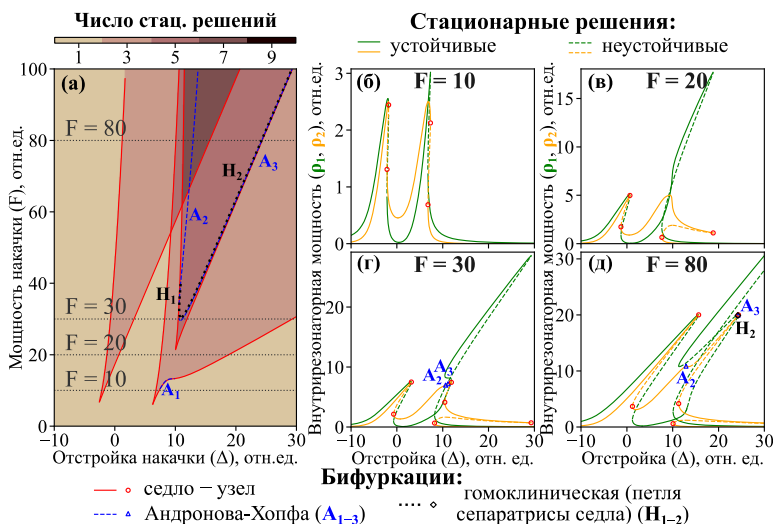


Рис. 1. (а) Полученная бифуркационная диаграмма и число стационарных состояний как функция параметров накачки при  $f_1 = f_2$ . (б–д) Рассчитанные зависимости внутрирезонаторных мощностей в стационарном режиме от частотной отстройки накачки при постоянной мощности накачки;  $f_1 = f_2$ .

Проведён анализ возможных переключений между устойчивыми стационарными состояниями в системе при медленном сканировании частоты накачки. Показано, что не все устойчивые ветки стационарного решения могут быть достигнуты таким образом при  $f_1 \gtrsim f_2$ ; однако, это возможно реализовать в случае  $f_1 < f_2$ .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-72-10188-П.

1. L. Jin et al., APL Photonics. 2020, **5**, 056106.
2. Marisova M.P. et al., Sensors. 2023, **23**, 717.

## Оптимизация волоконного встречного ввода накачки через боковую поверхность в конусном световоде, легированном иттербием

**Михайлов Е.К.<sup>1</sup>, Ширманкин Андрей В.<sup>2</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,*

*Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва*

*2- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [egor.mikhailov@fo.gpi.ru](mailto:egor.mikhailov@fo.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-37-39

Для создания волоконных импульсных лазеров с высокой пиковой мощностью необходимо использовать световоды с большой площадью моды, тем самым повышая порог возникновения нежелательных нелинейных эффектов. Одним из наиболее перспективных дизайнов таких световодов являются конусные световоды (КС), диаметр сердцевины и оболочки которых плавно меняется вдоль их длины. Если сигнал вводят в тонкий одномодовый конец световода, то при распространении по нему фундаментальная мода претерпевает адиабатическое расширение без возбуждения мод высшего порядка, что приводит к одномодовому режим работы в световоде с выходным диаметром сердцевины до 100 мкм. С помощью КС в системах с волоконным вводом сигнала были продемонстрированы рекордные значения пиковой мощности как непосредственно на выходе из световода [1], так и при усилении чирпированных импульсов [2]. Однако, использование ввода накачки навстречу распространению сигнала приводит к необходимости применения объёмной оптики.

Целью настоящей работы является реализация на КС волоконного встречного ввода накачки, чтобы получить полностью волоконный усилитель с вводом накачки через боковую поверхность. Первые результаты описанного подхода были представлены в работе [3]. Мы использовали КС длиной ~2 м, аналогичный представленному в [2] (на толстом конце диаметр сердцевины составлял 40 мкм). Излучение на длине волны 1064 нм и мощностью 50 мВт вводили в тонкую часть в качестве сигнала. Ввод накачки осуществляли путем физического контакта боковых поверхностей жилы накачки и активного световода (рис. 1). Зона контакта располагалась на расстоянии 6 см от выходного торца КС. Важно

отметить, что активный световод имел вторую оболочку, легированную фтором. Она была предварительно стравлена плавиковой кислотой на участке длиной 7 см. Для увеличения эффективности перекачивания излучения накачки жилы имели локальную биконическую структуру. Уменьшение диаметра приводит к увеличению числовой апертуры и снижению отношения площадей поперечного сечения жилы и активного световода, что позволяет более эффективно перекачивать накачку в активный световод. Жилы накачки изготавливали из кварц-полимерного световода диаметром 125 мкм. Требуемый профиль диаметра достигали плавным вытягиванием из плавиковой кислоты или при растягивании в процессе нагрева с помощью установки Vytran GPX 3400.

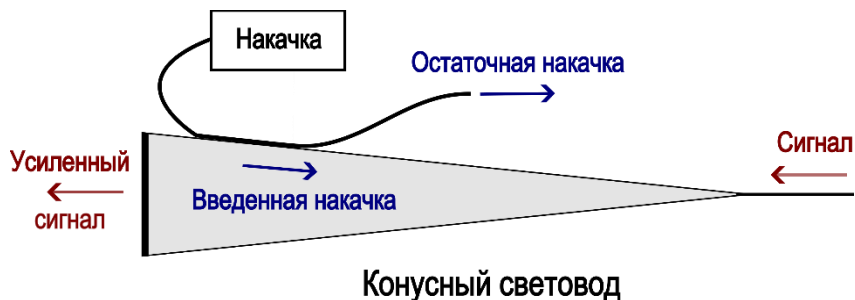


Рис. 1. Схема волоконного ввода накачки в КС

В работе [3] одновременно использовали сразу три жилы, диаметр которых уменьшался до  $\sim 30$  мкм. Излучение двух лазерных диодов накачки, работающих на длине волны 976 нм и суммарной мощностью 28 Вт, вводили в две из них. Остаточное излучение через объединитель накачки вводили в третью жилу. Стоит отметить, что в этом случае жилы были получены травлением. Для фиксации их покрывали полимером с показателем преломления меньшим, чем у световодов. В такой конфигурации эффективность ввода накачки составила  $\sim 75\%$  и позволила получить 9,1 Вт сигнала с пиковой мощностью 0,53 МВт. Дальнейшее увеличение средней мощности осложнено сгоранием полимерного покрытия области контакта или самого КС.

В настоящей работе было проведено более подробное исследование данного подхода. Для простоты предварительные эксперименты проводили с одной жилой, при помощи которой

накачку вводили в пассивный цилиндрический световод (с полимерным покрытием, обеспечивающим апертуру более 0,45 и с отражающим слоем из фторированного кварцевого стекла, обеспечивающим апертуру 0,26). Полимер для фиксации не использовали, чтобы исключить его сгорание при работе с большими мощностями излучения накачки. При использовании пассивного кварц-полимерного световода диаметром 800 мкм мы получили эффективность ввода 91 % при 100 Вт накачки, а при использовании кварц-кварцевого световода со фторированной второй оболочкой — 76 %. Таким образом, эффективно вводится в сигнальную жилу лишь накачка с относительно большой апертурой, что приводит к снижению эффективности ввода в кварц-кварцевый световод. Ситуация усугубляется в КС, диаметр которого постепенно уменьшается, что дополнительно увеличивает апертуру накачки и ее «вытекание» из первой отражающей оболочки. Увеличение диаметра талии жил накачки до 60 мкм способствует уменьшению апертуры накачки. В итоге, используя встречный волоконный ввод накачки в КС, мы получили 24 Вт средней мощности усиленного сигнала при 100 Вт накачки. Эффективность ввода при этом снизилась до 41 %. К тому же, около 20 Вт накачки оставалось в жиле, и ввод остаточного излучения через дополнительную жилу аналогично [2] может повысить эффективность до 50 %. Мы полагаем, что более низкая максимальная эффективность обусловлена отсутствием фиксирующего полимера в зоне контакта, нагрев которого, по всей видимости, приводил к нелинейному характеру эффективности (при высокой мощности эффективность ввода вырастала) в работе [2]. Более детально результаты исследований будут представлены на конференции.

Авторы выражают благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Лихачеву М.Е. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Mikhailov E.K., Bobkov K.K., Levchenko A.E. et al., *Photonics*. 2023, **10**, 1385.
2. Bobkov K., Levchenko A., Lipatov D. et al., *Photonics*. 2022, **9**(10), 771.
3. Bobkov K., Andrianov A., Koptev M. et al., *Opt. Express*. 2017, **25**, 26958–26972.



## Экспресс-анализ селена в почве спектроскопией лазерно-индуцированной плазмы

Рогачевская А.В.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [rogachevskaya.alex@yandex.ru](mailto:rogachevskaya.alex@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-40-41

Селен известен как один из ключевых микроэлементов для поддержания здоровья человека и животных, что стимулирует работы по разработке удобрений для почв. Однако, концентрация селена в почвах должна поддерживаться в узком интервале, так как и недостаток, и избыток селена приводят к серьезным заболеваниям. В связи с этим разработка экспресс-методов контроля состава почв непосредственно в полевых условиях является важной задачей. Применение стандартных аналитических методов определения селена в лабораторных условиях достаточно ограничено вследствие длительного цикла пробоподготовки (отбор проб, растворение в кислотах занимает десятки и сотни минут) и высокой стоимости анализа одного образца, что позволяет проводить только единичные измерения и исключает подробное картирование распределения селена на полях. Применение экспресс-подходов элементного анализа могло бы решить поставленную задачу по контролю селена на культивируемых полях. Методы рентгеновской спектроскопии не обладают достаточной чувствительностью для определения селена в полевых условиях [1], в то время как спектрометрия лазерно-индуцированной плазмы отличается более высокой чувствительностью к лёгким элементам и позволяет дистанционно производить измерения.

В настоящей работе впервые представлены результаты количественного элементного анализа селена в почвах спектрометрией лазерно-индуцированной плазмы. Выбор аналитической линии был затруднён вследствие спектрального наложения линий селена, железа и алюминия, а моделирование спектров лазерной плазмы не выявило подходящие варианты линий. Детальный анализ экспериментальных спектров почв с добавкой селена позволяет выбрать спектральную линию Se I 203.96 нм в качестве аналитической и получить градуировочные графики, по

которым были оценены точность и чувствительность определения селена в образцах почв (Рис. 1). Проведено изучение влияния количества точек лазерного пробоотбора (представительность анализа) на результаты количественного определения селена в почвах. Проведено сравнение аналитических возможностей определения селена (точность, чувствительность) для прессованных таблеток почвы и образцов почв без какой-либо пробоподготовки. Представлены возможности спектрометрии лазерно-индуцированной плазмы по картированию распределения селена по поверхности почв. Продемонстрирована возможность экспресс-картирования распределения селена по глубине керна почвы, что позволяет получать трёхмерные карты распределения селена в верхнем горизонте почвы. Результаты работы демонстрируют перспективы для разработки компактного лазерного прибора для установки на сельскохозяйственные машины или беспилотные авиационные носители для непрерывных автоматизированных измерений.

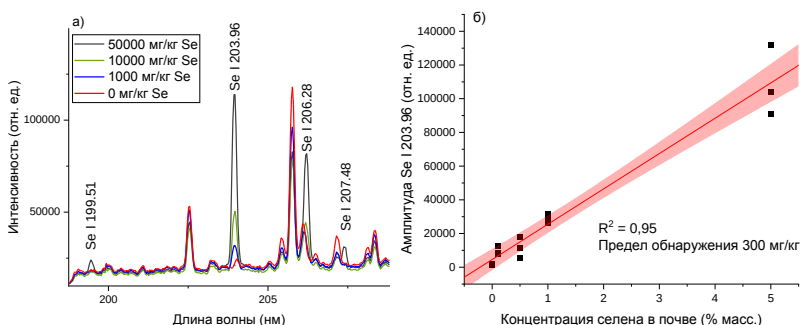


Рис. 1. Спектры плазмы (а) и градуировочный график (б) образцов прессованной почвы с содержанием селена 0 и  $1 \times 10^3 \div 5 \times 10^4$  мг/кг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта создания и развития научного центра мирового уровня «Центр фотоники» (соглашение № 075-15-2022-315 от 20 апреля 2022 г.).

1. Kalnicky D.J. and Singhvi R., Journal of Hazardous Materials. 2001, **83**, 93–122.

## Лазерный дальномер на основе время-цифрового преобразователя

**Сафронов Т.И., Катиков В.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [elektronik96@gmail.com](mailto:elektronik96@gmail.com)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-42-44

Целью работы является создание экспериментальной установки для исследования различных режимов функционирования времяпролётного лидара и тестирования отдельных узлов: лазерных источников, фотоприёмников различных типов, электронных модулей, режимов работы и алгоритмов обработки сигнала. Блок-схема установки приведена на Рис. 1.

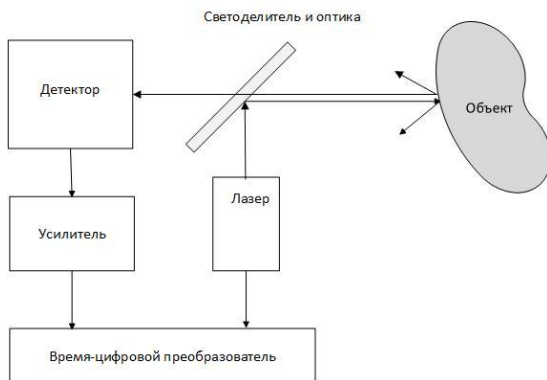


Рис. 1. Блок-схема  
импульсного времяпролётного лазерного дальномера.

Излучение лазера, рассеянное объектом, попадает на фотоприёмник. Мощность излучения, регистрируемого фотоприёмником, можно описать лидарным уравнением:

$$P_{RX} = \frac{G_{TX} \times G_{RX} \times P_{TX} \times \pi R^2}{2\pi D^2} \quad (1)$$

где:  $P_{RX}$  — мощность, принимаемая фотоприёмником,  $P_{TX}$  — мощность, передаваемая излучателем,  $G_{TX}$  — эффективность передающего элемента,  $G_{RX}$  — эффективность приёмного элемента,  $R$  — радиус объектива,  $\pi R^2$  — его площадь,  $2\pi$  — телесный угол, под

которым свет рассеивается на мишени, и  $D$  — расстояние между мишенью и фотоприёмником. В уравнении (1) предполагается, что вся энергия излучателя попадает на объект. В противном случае,  $P_{RX}$  будет зависеть от  $1/D^4$ , а не от  $1/D^2$ .

Импульсный дальномер состоит из лазерного излучателя, работающего в импульсном режиме с наносекундной длительностью, приёмного канала, включающего объектив, р-и-п или лавинный фотодиод, усилитель, автоматический регулятор усиления и временной дискриминаторы. Излучаемый лазером световой импульс (стартовый импульс) запускает таймер, измеряющий временной интервал, а отражённый световой импульс (стоп-импульс) останавливает его. Расстояние до цели пропорционально временному интервалу [1, 2].

Основой измерительного стенда является 16-канальный время-цифровой преобразователь «Time-to-Digital Converter SC-TDC-1000 S Series» производства компании «Surface Concept» со следующими параметрами: размер ячейки цифрового времени 82,3 пс, диапазон измерения: не ограничен в эталонном режиме и 10,5 мкс в режиме старт-стоп, промежуток между двумя циклами измерений от 0 Гц до 7 МГц, разделение входных импульсов по одному каналу 5,5 нс.

Кроме времени задержки между импульсами, прибор позволяет вычислять и записывать корреляционную функцию между каналами или автокорреляционную функцию во временной области. Управление режимом работы прибора осуществляют через конфигурационный файл, а параметры измерений задают через программный интерфейс.

В качестве источника лазерного излучения был использован твердотельный неодимовый лазер отечественного производства DTL-329QT с накачкой полупроводниковыми диодами, работающий в режиме модуляции добротности со следующими параметрами: длина волны 1053 нм, средняя энергия в импульсе до 300 мкДж, длительность импульса 7 нс, диаметр пучка 2,3 мм, расходимость излучения 1 мрад, поляризация вертикальная 100:1. Энергию импульса и частоту повторения можно задавать через программный интерфейс.

В качестве приёмника излучения применяли компактный счётчик фотонов «H7155» производства компании «Hamamatsu», состоящий из фотоумножителя, формирователя TTL-импульсов и

высоковольтного источника питания, с напряжением питания +5 В. Для защиты фотоприёмника от внешней засветки, которая может вызвать его повреждение, использовали малогабаритный двойной монохроматор МСД-2 с оптоволоконным входом. В оптической схеме также применяли светофильтры и поляризаторы.

Так как максимум чувствительности фотоприёмника лежит в диапазоне 500–600 нм, частоту излучения лазера удваивали с помощью кристалла иодата лития. Для этих же целей может быть использован параметрический удвоитель частоты на основе кристалла  $\text{LiNbO}_3$ .

Реализация измерений на основе время-цифрового преобразователя в случае применения в качестве источника излучения источника запутанных фотонов, например, на оптоволокне или параметрическом генераторе света и двух модулей счета одиночных фотонов, позволит исследовать квантовый режим измерений [3, 4].

Авторы выражают благодарность Красовскому В.И. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

1. Chevrier M., Campanella G., Analog Applications Journal. 2017 **1Q** 1–5.
2. Amann M., Camichel R., Myllyla R., Rioux M., Opt. Eng. 2001, **40**(1), 10–19.
3. Murchie R., Pritchard J., Jeers J., Quantum Communications and Quantum Imaging XIX SPIE Proceedings. 2021, **11835**, 118350G.
4. Maccarone A., Drummond K., McCarthy A., et al., Optic Express. 2023, **31**(10), 16690.

## **Исследование способов объёмной намотки резонатора кольцевого волоконного лазера ультракоротких импульсов на основе эффекта нелинейного вращения поляризации**

**Семиренченков А.А., Худяков Д.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
Центр физического приборостроения, Троицк*

*E-mail: [semirenchenkov@pic.troitsk.ru](mailto:semirenchenkov@pic.troitsk.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-45-47

За счет нелинейных (нерезонансных) эффектов волоконные оптические системы предоставляют возможности, благодаря которым само оптическое волокно может быть использовано в качестве модулятора интенсивности для генерации ультракоротких импульсов (УКИ) в волоконных лазерах. Однако при использовании нерезонансных модуляторов интенсивности, основанных на нелинейных эффектах в оптических волокнах, возникает проблема стабилизации импульсной генерации, а также оптимальной конфигурации лазерного резонатора, при которой поляризационная нестабильность генерации и её зависимость от внешних условий будут минимальными.

Одним из нерезонансных методов модуляции интенсивности лазерного излучения для пассивной синхронизации мод в волоконных лазерах УКИ является метод, основанный на эффекте нелинейного вращения поляризации (НВП). С появлением в 1992 году первых сообщений об использовании эффекта НВП для генерации УКИ в кольцевом волоконном лазере [1] исследовали различные схемы и режимы работы лазеров УКИ на основе эффекта НВП.

Несмотря на очевидные преимущества, волоконные лазеры УКИ на основе эффекта НВП обладают значительной нестабильностью импульсной генерации и зависимостью параметров выходного излучения от внешних условий. Эффекты случайных колебаний температуры и напряжений в оптическом волокне приводят к локальным изменениям показателя преломления и, соответственно, к изменению состояния поляризации циркулирующего излучения. Изменение состояния поляризации

приводит к нестабильности выходных характеристик импульсного излучения.

Чтобы решить данную проблему, в исследовании [2] был продемонстрирован полностью волоконный иттербиевый лазер УКИ с синхронизацией мод на основе эффекта НВП, реализованный на основе оптического волокна с сохранением поляризации (РМ), который генерировал лазерные импульсы с частотой 20,54 МГц, длительностью около 150 фс и энергией 0,85 нДж. Также есть сообщение об иттербиевом волоконном лазере УКИ на основе эффекта НВП, в конфигурации которого использовали сваренные под некоторым углом участки РМ-волокон [3]. Используя оптимальный угол сварки, полученный теоретическим расчетом, авторы экспериментально получили стабильный импульсный режим в волоконном лазере с частотой следования импульсов 111 МГц и энергией импульса 0,47 нДж. Следует отметить, что проблема стабильной импульсной генерации в лазерах УКИ на основе эффекта НВП остается до конца не решённой, а примеры их использования до сих пор были ограничены только лабораторными применениями.

Ранее была предложена схема объёмной намотки кольцевого волоконного резонатора для компенсации индуцированных изменений показателя преломления на изгибах волокна для уменьшения поляризационной нестабильности в волоконном лазере на эффекте НВП (патент RU2540484C1), что позволило значительно уменьшить зависимость выходных характеристик излучения от внешних условий. В рамках данной работы осуществлён поиск наиболее оптимальных параметров объёмной намотки иттербиевого кольцевого волоконного резонатора для стабильной импульсной генерации без необходимости дополнительной регулировки элементов волоконной схемы в процессе эксплуатации и исследование зависимости стабильности и характеристик импульсной генерации в резонаторе от параметров его намотки.

Намотку кольцевого волоконного резонатора производили на две взаимно перпендикулярно расположенные катушки. В эксперименте использовали парные катушки диаметрами 7,5 и 3,5 см. Также изменяли расстояние между катушками. Таким образом, диаметр катушек и расстояние между ними являлись геометрическими параметрами объёмного кольцевого волоконного резонатора. В результате проведенных испытаний удалось добиться

стабильной импульсной лазерной генерации в температурном диапазоне  $\pm 4^\circ\text{C}$ . По мере уменьшения диаметра катушек стабильность импульсного режима работы резонатора ухудшалась. В случае катушек с диаметром 3,5 см не удалось добиться стабильного импульсного режима работы, и проявлялся стохастический режим.

Полученный импульсный кольцевой волоконный лазер с объёмной намоткой резонатора генерировал лазерные импульсы с частотой следования 18 МГц, средней мощностью излучения около 20 мВт и длительностью 12–15 пс. Ниже представлена автокорреляционная функция лазерного импульса (рис. 1). Длительность лазерных импульсов практически не зависела от геометрии резонатора, но проявлялась незначительная зависимость от регулировки элементов волоконной схемы (контроллеров поляризации).

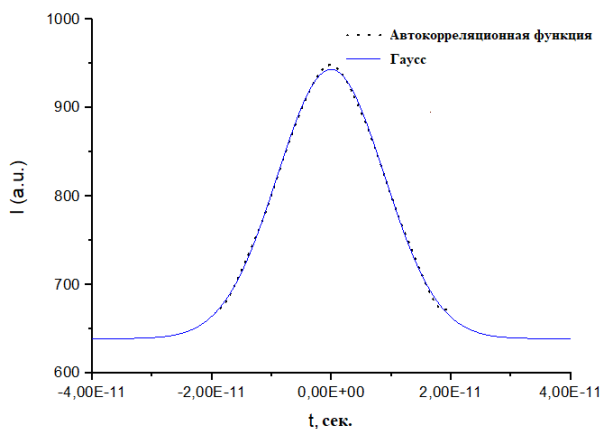


Рис. 1. Автокорреляционная функция импульса  
кольцевого волоконного лазера  
с объёмной намоткой резонатора.

1. Chen C.-J., Wai P.K.A., Menyuk C.R., Opt. Lett. 1992, **17**(6), 417–419.
2. Szczepanek J., Kardas T.M., Radzewicz C., et al. Opt. Lett. 2017. **42**(3), 575–578.
3. Zhang W., Liu Y., Wang C., et al., Opt. Express. 2018, **26**(7), 7934–7941.



# **Датчик формы на основе многосердцевинного оптического волокна с брэгговскими решётками**

**Тимохин А.С., Журавлев С.Г.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [sashatimokhin123@bk.ru](mailto:sashatimokhin123@bk.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-48-50

В таких областях как, например, робототехника, авиастроение, медицина и т. д. стоит задача определения формы и положения объекта или механизма [1]. В научной литературе для решения подобных задач предлагают использовать датчики формы, основанные на многосердцевинном оптическом волокне со множеством массивов брэгговских решёток, расположенных по длине волокна через определённые интервалы [2]. Опрос брэгговских решёток, расположенных в разных сердцевинах и в различных местах по длине волокна, позволяет восстановить форму расположения волокна на плоскости или в пространстве. Однако запись большого количества массивов брэгговских решёток на одном отрезке волокна и их опрос являются технически сложными задачами. В данной работе предложен альтернативный подход, заключающийся в определении формы расположения в пространстве или на плоскости канала с малым диаметром за счёт перемещения многосердцевинного оптического волокна с одним массивом брэгговских решёток вдоль исследуемого канала.

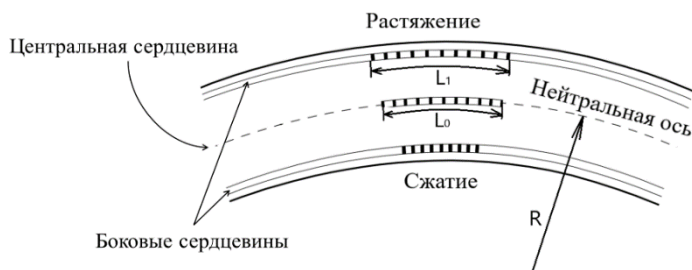


Рис. 1. Схема продольного сечения изогнутого многосердцевинного оптического волокна с брэгговскими решётками.

Принцип действия предложенного датчика формы заключается в следующем. В каждой из выбранных точек на оси канала с помощью массива брэгговских решёток проводят измерения кривизны и направления изгиба. Принцип этого продемонстрирован на рис. 1. Сердцевины, расположенные ближе к центру изгиба, подвержены сжатию, дальше — растяжению [3]. По изменению длины волны брэгговского отражения в различных сердцевинах можно найти кривизну и направление изгиба в каждой точке вдоль оси канала. По полученным значениям кривизны и направления изгиба в ряде точек вдоль оси канала проводят восстановление формы расположения канала в пространстве [4].

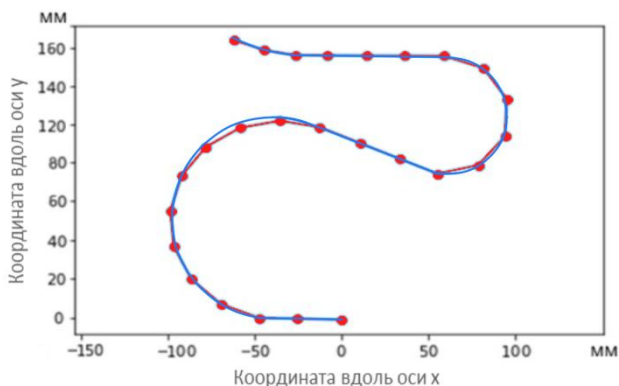


Рис. 2. Реальное расположение канала на плоскости (синяя линия) и расположение канала, рассчитанное матричным методом (красная линия).

Для создания датчика использован отрезок многосердцевинного оптического волокна, изготовленного в ИОФ РАН. Для ввода и вывода излучения из каждой сердцевинки многосердцевинного оптического волокна использовали устройство ввода-вывода, также разработанное и изготовленное в ИОФ РАН. Предварительно проведены измерения чувствительности датчика к кривизне изгиба. Измеренная максимальная чувствительность к кривизне составила  $0,050 \text{ нм/м}^{-1}$ , в то время как расчётное значение составило  $0,049 \text{ нм/м}^{-1}$ . Для измерения формы расположения пластикового канала проводили перемещение массива волоконных брэгговских решёток вдоль канала с шагом 20 мм. По полученным данным матричным методом была восстановлена форма расположения

канала, для чего была написана программа на языке Python. Сравнение рассчитанной и реальной формы расположения канала представлено на рис. 2. Максимальное отличие рассчитанной и реальной формы расположения канала не превышало 1,7 мм по оси ординат и 0,6 мм по оси абсцисс, что составляет 2,89 и 1,52 %, соответственно.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Егоровой О.Н. и д.ф.-м.н. Семёнову С.Л. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждении результатов. Отдельная благодарность к.ф.-м.н. Рыбалтовскому А.А. (НЦВО-Фотоника) за запись брэгговских решёток.

1. Amanzadeh M., Aminossadati S.M., Measurement. 2018, **128**, 119–137.
2. Duncan R.G., Froggatt M.E., Kreger S.T., et al., Proc. SPIE. 2007, **6530**, 65301S, 65301S-11.
3. Flockhart G.M.H., MacPherson W.N., Barton J.S., et al., Opt. Lett. 2003, **28**(6), 387–389.
4. Paloschi D., Bronnikov K.A., IEEE Sens. J. 2020, **21**, 4599–4609.

**Апробация  $\text{LiGaSe}_2$  с антиотражающими микроструктурами  
в качестве активной нелинейной среды  
для параметрического преобразования лазерного излучения  
в средний инфракрасный диапазон (5–9 мкм)**

**Харитонов П.Д.<sup>1,2</sup>**

1- *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

2- *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

E-mail: [polincharik@ya.ru](mailto:polincharik@ya.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-51-53

В качестве апробируемого активного элемента был использован кристалл  $\text{LiGaSe}_2$  (LGSe) апертурой  $5 \times 5 \text{ мм}^2$  и длиной 7 мм, вырезанный в направлении  $\theta = 90^\circ$ ,  $\phi = 39^\circ$ . На оба плоскопараллельных полированных торца кристалла были нанесены антиотражающие микроструктуры, увеличивающие пропускание кристалла LGSe до  $T_{\text{LGSe}} = 75 \%$  для сигнальной волны на длинах волн в диапазоне 2714–2418 нм. Для генерации сигнальной волны использовался параметрический генератор света (ПГС), где также происходила однопроходная генерация холостой волны с разностной частотой на длинах волн в диапазоне 4926–8866 нм под действием параметрической накачки на длинах волн в диапазоне 1750–1900 нм, предварительно получаемых при параметрической генерации света в кристалле  $\text{KTiOPO}_4$  (КТР) длиной 20 мм под действием лазерной накачки с исходной длиной волны 1064 нм.

В качестве источника лазерной накачки с исходной длиной волны 1064 нм использовали наносекундный ИАГ:Nd-лазер с электрооптической модуляцией добротности резонатора с энергией импульса излучения 25 мДж и длительностью импульса 10 нс. Предлагаемая оптическая схема двойного ПГС на кристаллах КТР и LGSe с единым резонатором, высокодобротным для волны (2714–2418 нм), которая является сигнальной как в кристалле КТР, так и в кристалле LGSe, представлена на рис. 1. На рисунке для примера показана генерация сигнальной волны с длиной 2504 нм одновременно в двух процессах: 1)  $1064 \text{ (в)} \rightarrow 2504 \text{ (г)} + 1850 \text{ (в)}$  в кристалле КТР; 2)  $1850 \text{ (в)} \rightarrow 2504 \text{ (г)} + 7081 \text{ (в)}$  в кристалле LGSe. В скобках указано состояние поляризации взаимодействующих волн в лабораторной системе координат (в — вертикальная, г —

горизонтальная). Для отдельной регистрации генерируемой сигнальной волны (2504 нм) на выходе преобразователя устанавливали под углом Брюстера стопу германиевых пластин, пропускающую горизонтально поляризованное излучение с длиной волны 2504 нм. Настоящая схема представляет интерес благодаря наибольшей добротности резонатора, позволяющей получить самый низкий порог генерации.

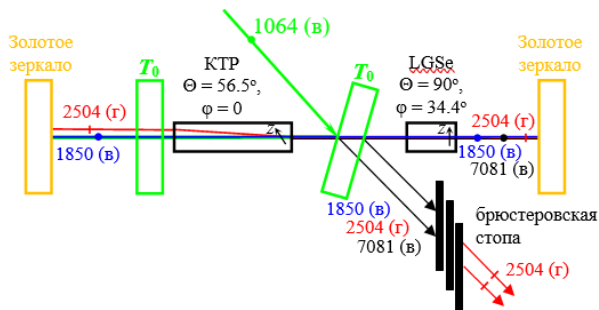


Рис. 1. Оптическая схема двойного ПГС на кристаллах KTP и LGSe.

Также было проведено моделирование двойного ПГС в программном продукте SNLO. Расчеты показали, что для увеличения эффективности преобразования целесообразно использовать максимально компактную упаковку оптических элементов с уменьшением длины резонатора до  $L = 80$  мм, а также наименьший радиус пучка накачки  $r = 0,9$  мм, равный величине сноса пучка необыкновенной волны в кристалле KTP. Эффективность преобразования из исходной волны лазерной накачки (1064 нм) в наиболее длинную холостую волну (7081 нм) оценивается как 0,3 % при квантовой эффективности 2 %.

С учетом результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование генерации двойного ПГС на кристаллах KTP и LGSe. Как и ожидалось, наиболее эффективную генерацию удалось получить в наиболее коротком резонаторе ( $L = 80$  мм) и при наименьшем радиусе пучка ( $r = 0,9$  мм). Поворот кристаллов KTP и LGSe в плоскости синхронизма позволяет перестраивать длины волн выходного излучения. Рис. 2 демонстрирует результаты перестройки длин волн параметрической генерации двухмикронного излучения, полученной при повороте

кристалла КТР, в представленной ранее схеме ПГС. Под действием лазерной накачки (1064 нм) экспериментально реализована перестраиваемая генерация сигнальной и холостой волн в кристалле КТР в диапазонах перестройки 1766–1900 нм и 2636–2418 нм. Генерация разностной частоты для этих волн, реализуемая в кристалле LGSe, обеспечивает диапазон длин волн перестраиваемого инфракрасного излучения 5351–8869 нм. В результате эксперимента наблюдали увеличение доли сигнальной волны (2504 нм) в выходном излучении в присутствии кристалла LGSe, что согласуется с результатами моделирования и доказывает успешную работу кристалла LGSe как активного кристалла двойного ПГС с единой сигнальной волной.

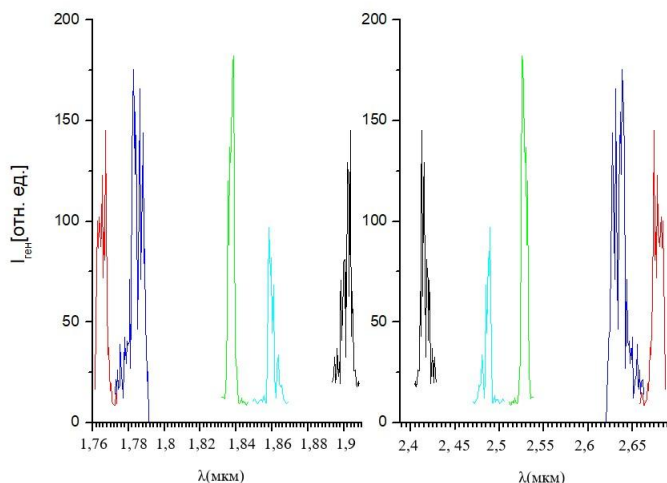


Рис. 2. Полученные спектры

перестраиваемого выходного двухмикронного излучения:  
красные линии – пара 1766 и 2677 нм; синие линии – 1784 и 2636 нм;  
зеленые линии – 1838 и 2527 нм; голубые линии – 1858 и 2490 нм;  
черные линии – 1900 и 2418 нм.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Сметанину С.Н. и н.с. Папашвили А.Г. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-72-10027-П.

**Релятивистская ионизация тяжёлых атомов  
в поле жёстко фокусированных лазерных пучков  
экстремальной интенсивности**

**Худов А.В.<sup>1</sup>, Баранов Д.Д.<sup>2</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва*

*E-mail: [khudov2015@yandex.ru](mailto:khudov2015@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-54-56

Получение лазерных импульсов мощностью в несколько петаватт (ПВт,  $10^{15}$  Вт), ставшее возможным в течение последнего десятилетия, открывает широкие перспективы исследований фундаментальных эффектов взаимодействия электромагнитных полей экстремальной интенсивности с веществом и вакуумом [1, 2]. Критически важным параметром, величина которого определяет возможность наблюдения нелинейных явлений классической и квантовой электродинамики при таком взаимодействии, является интенсивность излучения. В настоящее время на лазерной установке CORELS [3], по-видимому, достигнут рубеж  $\sim 10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>. С переходом мощности в суб-экзаваттный режим, что, в частности, планируется осуществить в рамках проекта XCELS [4], могут быть достигнуты интенсивности около  $10^{25}$  Вт/см<sup>2</sup>. В столь сильных полях будет наблюдаться глубокая ионизация многоэлектронных атомов, приводящая к образованию ионов с зарядом  $Z \sim 50$ . Этот процесс может быть использован в том числе для прямой диагностики сверхвысоких интенсивностей в фокусе лазерного пучка [5].

Ионизация атомов и положительных ионов в интенсивных лазерных полях инфракрасного и оптического диапазона длин волн протекает в туннельном режиме. Чем выше интенсивность, тем ближе динамика ионизации к туннелированию в постоянном поле [6]. Теория туннельной ионизации в сверхсильном электромагнитном поле, в том числе с учетом релятивистских эффектов, была подробно развита в работах В.С. Попова с соавторами [7] (см. также ссылки в обзоре [6]). Однако, в этих работах для описания поля лазерной волны использовали приближение, в котором векторы напряжённости электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей считали

перпендикулярными, хотя и не обязательно равными по величине. Рассматривали также случай параллельных полей.

В случае лазерных пучков петаваттной и суб-экзаваттной мощности получение сверхвысоких интенсивностей излучения возможно только при очень жёсткой фокусировке на уровне дифракционного предела. В этом случае поля  $E$  и  $H$  в локальной области не ортогональны и не равны по величине. Соответственно, для описания релятивистской ионизации глубоких атомных уровней в таких лазерных полях полученные в [6, 7] результаты нуждаются в обобщении. Это обобщение нетривиально, поскольку задача о релятивистских связанных состояниях является плохо определённой в произвольной инерциальной системе отсчета.

В данной работе мы представляем обобщение квазиклассического выражения для скорости релятивистской ионизации уровня в постоянном электромагнитном поле [7] на случай, когда пространственная конфигурация этого поля произвольна. В расчётах использован метод мнимого времени [6], траектории для которого вычисляют путём перехода в систему отсчёта, в которой поля  $E$  и  $H$  параллельны, а затем, после обратного перехода в систему покоя многозарядного иона, начальные условия для этих траекторий определяют так, чтобы обеспечить возможность ионизации.

Получены трансцендентные уравнения для комплексного момента ионизации и наиболее вероятного импульса электрона после его выхода из-под потенциального барьера. Численное решение этих уравнений позволяет найти скорость образования многозарядных ионов в сверхсильном жёстко фокусированном поле лазерного излучения. Полученные результаты представляют интерес для диагностики мощных лазерных пучков и физики лазерной плазмы.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Попруженко С.В. за постановку задачи и обсуждение полученных результатов.

1. Попруженко С.В., Федотов А.М., УФН. 2023, **193**, 491.
2. Fedotov A.M., Ilderton A., Karbstein F. et al., Phys. Rep. 2023, **1010**, 1.
3. Yoon J.W., Kim Y.G., Choi I.W. et al., Optica. 2021, **8**, 630.
4. Bashinov A.V., Gonoskov A.A., Kim A.V. et al., Eur. Phys. J. Spec. Top. 2014, **223**, 1105.



5. Ciarrina M.F., Popruzhenko S.V., Bulanov S.V. et al., Phys. Rev. A. 2019, 99, 043405.
6. Попов В.С., УФН. 2004, **174**, 921.
7. Мур В.Д., Карнаков Б.М., Попов В.С., ЖЭТФ. 1998, **114**, 798.

**Определение степени окисления платины  
в комплексах с органическим реагентом диэтилдитиокарбаматом  
методом масс-спектрометрии с лазерной десорбцией/ионизацией**

**Чередова Д.И.<sup>1</sup>, Лаптинская П.К.<sup>2</sup>, Тимакова С.И.<sup>3</sup>**

*1- Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*

*2- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*3- Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского  
Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [cheredova.diana@mail.ru](mailto:cheredova.diana@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-57-59

В настоящее время не существует простого метода определения степеней окисления платины, находящейся в растворе, хотя решение такой задачи является актуальным в технологии производства некоторых лекарственных препаратов, драгоценных металлов и в процессах органического синтеза. Основному рабочему на сегодняшний день методу, позволяющему определить наличие различных степеней окисления данного элемента в растворе, 90 лет [1]. Основа этого метода — трудоемкое и затратное по времени потенциометрическое титрование платины, которое практически не используется в современных лабораториях. Часто для определения платины в растворе используют метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), который является высокочувствительным методом качественного и количественного определения элементного состава объекта. Однако он не позволяет ответить на вопрос, в какой степени окисления находится элемент. В качестве альтернативного варианта предложен метод матрично-активированной лазерной десорбции/ионизации с времяпролётной масс-спектрометрией (MALDI-TOF MS). Данный метод предоставляет возможность регистрировать комплексные соединения металлов с органическими лигандами в форме молекулярных ионов, в том числе комплексные соединения платины [2]. Тем не менее, в опубликованной ранее статье не была показана возможность единовременной регистрации в масс-спектре ионов комплексных соединений Pt (II) и Pt (IV). Данное исследование простимулировало развитие новых масс-спектрометрических методов, позволяющих определять платину в двух разных степенях окисления.

В представленной работе нами предложен новый подход, основанный на лазерной десорбции\ионизации исследуемых комплексов с наноструктурированной поверхности оксида молибдена, продемонстрировавшего высокую эффективность в определении комплексных соединений. Для приготовления подложек-эмиттеров ионов с рабочим поверхностным оксидным слоем молибдена применяется термическое окисление молибденовых пластин [3].

Ионы  $Pt^{2+}$  и  $Pt^{4+}$ , находящиеся в водном растворе, переводятся в комплексные соединения диэтилдитиокарбамата (DTC) путем введения в водный раствор в качестве реагента диэтилдитиокарбамата натрия ( $C_5H_{10}NS_2Na \times 3H_2O$ ). Такие комплексы нерастворимы в воде, но хорошо растворимы в хлороформе.

В времяпролетный масс-спектрометр, выполненный по линейной схеме, помещали подложку-эмиттер ионов с нанесенными на ее поверхность комплексными соединениями платины из раствора хлороформа. Десорбцию/ионизацию исследуемых соединений с поверхности оксида молибдена проводили излучением третьей гармоники Nd:YAG лазера (длина волны 355 нм, длительность импульса 0,35 нс, частота повторения импульсов 175 Гц). Значение плотности энергии на поверхности подложки-эмиттера ионов составляло 20 мДж/см<sup>2</sup>.

Платина в разных степенях окисления формирует DTC-комплексы с разным количеством лигандов в составе. В результате, при их ионизации мы регистрируем в масс-спектре ионы в форме  $[Pt(DTC)_2]^+$  для Pt (II) и  $[Pt(DTC)_3]^+$  для Pt (IV) с различающейся молекулярной массой. Данный масс-спектр представлен на рис. 1.

На рис. 2 показано совмещение экспериментальных масс-спектров комплексных соединений диэтилдитиокарбамата платины (II) (слева) и диэтилдитиокарбамата платины (IV) (справа) с модельными масс-спектрами.

Реализованный нами масс-спектрометрический подход позволяет достичь высокой чувствительности, характеризующейся значением 266330 счётов/пг, что примерно в 200 раз превосходит лучший опубликованный результат, полученный методом MALDI - TOF - MS [2].

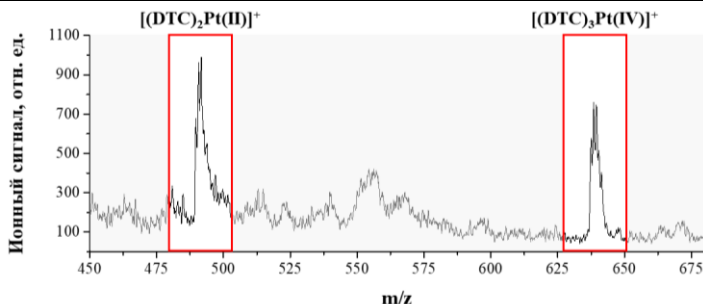


Рис. 1. Масс-спектр комплексных соединений Pt(II) и Pt(IV) с диэтилдитиокарбаматом

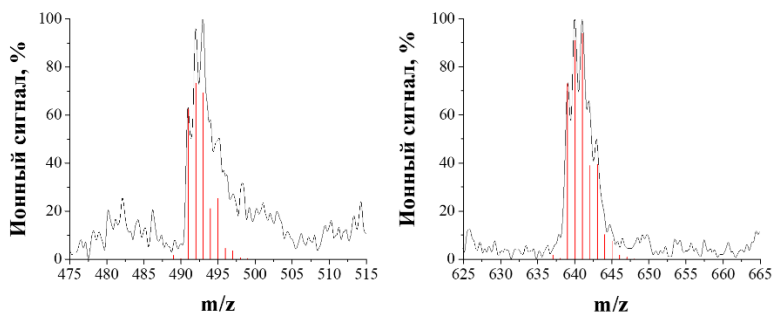


Рис. 2. Экспериментальный и теоретический масс-спектры для комплексов  $C_{10}H_{20}N_2S_4Pt$  (слева) и  $C_{15}H_{30}N_3S_6Pt$  (справа)

Авторы выражают благодарность научным руководителям: к.ф.-м.н. Никифорову С.М. и д.х.н. Гречникову А.А., а также коллегам к.т.н. Симановскому Я.О. и к.ф.-м.н. Пенто А.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждении полученных результатов.

Исследование выполнено при поддержке проекта Минобрнауки России № 075-15-2022-315.

1. А.А. Гринберг и Б.В. Птицын. Известия Института по изучению платины. 1934, (12).
2. Minakata K. et al. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2014, **406**, 1331–1338.
3. Grechnikov A.A. et al. Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2022, **414**(23), 6929–6937.

**Перестраиваемый лазер  
с использованием оптического фильтра  
на основе конического волокна**

**Ширманкин Андрей В., Камынин В.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [andreishirmankin34@gmail.com](mailto:andreishirmankin34@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-60-62

Волоконные лазеры, в которых выходные длины волн можно перестраивать, представляют интерес в различных областях науки и техники. К примеру, данные лазеры могут быть применены в различных областях оптической связи, мониторинга загрязнения окружающей среды, обнаружения опасных газов. Кроме того, перестраиваемые лазеры также широко используются в таких областях как спектроскопия и микроскопическая визуализация.

Одним из методов создания перестраиваемых лазеров является использование оптических фильтров. Этот способ является простым в реализации. В частности, волоконные оптические фильтры имеют большое значение для проектирования полностью волоконных перестраиваемых лазерных систем [1–3].

В данной работе будет рассмотрено использование конических волокон для создания фильтра, пригодного в разработке перестраиваемого лазера.

Для создания конических волокон использовали установку Vytran GPX 3400. С помощью данной установки можно создавать конические волокна различной длины с разными диаметрами перетяжки. В эксперименте использовали коммерчески доступное одномодовое оптическое волокно SM332, имеющее диаметры сердцевин и оболочки 8 и 125 мкм, соответственно. На рис. 1 представлены волоконные конусы, изготовленные на рабочей станции GPX3400 для эксперимента, образцы имели следующие параметры: диаметр сужения 20 мкм и длина 40 мм.



Рис. 1. Профиль волоконных конусов с перетяжкой 20 мкм и длиной 40 мм.

Схема лазера представлена на рис. 2. В качестве накачки использовали одномодовый лазерный диод с длиной волны 976 нм. В качестве активной среды выступало эрбиевое волокно длиной 4 м. Перестраиваемый оптический фильтр основан на изготовленном ранее коническом волокне. Данное коническое волокно изгибали с помощью микрометрической подвижки на заданный угол от 0 до 150 градусов, в результате чего происходит сдвиг длины волны генерации лазера.

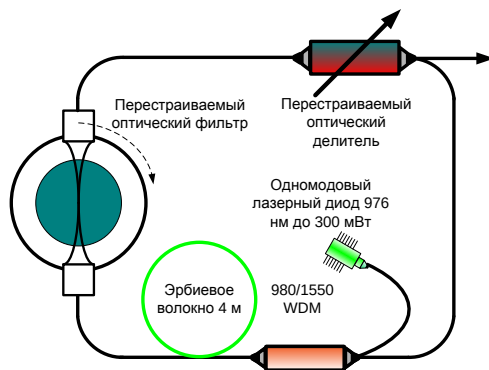


Рис. 2. Схема лазера, используемого в эксперименте.

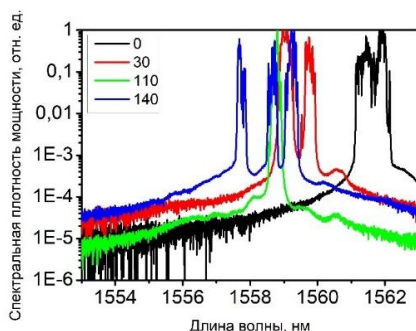


Рис. 3. Спектры пропускания конического волокна с диаметром перетяжки 20 мкм при различных углах изгиба: 0, 30, 110, 140 градусов

В работе были зарегистрированы представленные на рис. 3 спектры генерации волоконного лазера с оптическим фильтром на основе конического волокна при различных углах его изгиба. Видно,

что при увеличении угла изгиба конического волокна происходит смещение пика генерации лазера в более коротковолновую область спектра.

В данной работе была продемонстрирована возможность использования конического волокна с диаметром перетяжки 20 мкм и ее длиной 4 см в качестве оптического фильтра для волоконного лазера, работающего в ближнем ИК диапазоне.

1. Zhang L., Zhu K., Yao Y. et al., J. Micromachines. 2023, **14**, 116–138.
2. Huiyun H., Xingliang L., Shumin Z. et al., J. Lightwave Technology. 2018, **37**, 715–721.
3. Kieu K., Mansuripur M. J. Optics Letters. 2006, **31**, 2435–2437.

## Исследование модовой динамики в волоконном лазере с коротким резонатором

**Камынин В.А., Трикшев А.И., Ширманкин Антон В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [shirmankin123@gmail.com](mailto:shirmankin123@gmail.com)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-63-65

Узкополосные волоконные лазеры, работающие в режиме генерации нескольких ортогонально-поляризованных мод, представляют интерес в качестве прецизионных линейных датчиков температуры и деформаций [1, 2]. Частота биений поляризационных мод находится в радиочастотном (РЧ) диапазоне, что даёт преимущества в виде простоты процедуры опроса, высокого соотношения сигнал/шум, абсолютного кодирования и возможности мультиплексирования нескольких датчиков.

В данной работе предметом исследования являлся волоконный лазер с коротким резонатором Фабри-Перо. Активное волокно представляло собой композитный иттербиевый световод стандартного диаметра (125 мкм) с высоким содержанием (2,5 вес. %) ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в сердцевине [3]. Резонатор был сформирован на отрезке световода длиной  $\sim 2$  см двумя брэгговскими решётками с максимумом отражения на длине волны  $\sim 1069$  нм. Для накачки использовали одномодовый лазерный диод с длиной волны 976 нм. Сам лазер при этом работал в непрерывном режиме.

На рис. 1 показана зависимость спектральной плотности мощности от длины волны и мощности накачки. При изменении мощности накачки наблюдали спектральные сдвиги и переключение с двухмодового режима генерации на трёхмодовый.

Для анализа высокочастотных (ВЧ) биений использовали анализатор сигналов Keysight n9020b. Серия ВЧ спектров представлена на рис. 2.



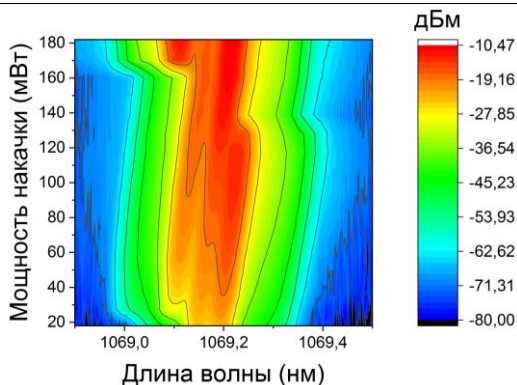


Рис. 1. «Тепловая» карта спектральной плотности мощности при различной мощности накачки.

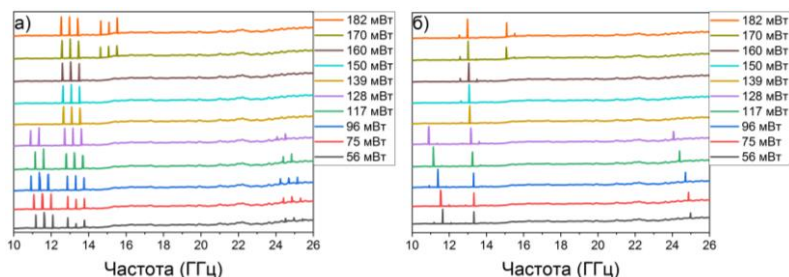


Рис. 2. ВЧ спектры излучения лазера при различной мощности накачки и разных положениях контролера поляризации и постоянной температуре резонатора 18 °С: а) положение 1; б) положение 2.

Как видно из рис. 2, при увеличении мощности накачки наблюдается смещение ВЧ-спектра в область низких частот. При мощности накачки от 56 до 128 мВт ВЧ-биения наблюдаются в районе 11,6, 13,4 и 25 ГГц. Отсутствие ВЧ-биений в районе 11,6 и 25 ГГц при мощностях накачки от 139 до 160 мВт связано с переключением режима генерации с трёхмодового в двухмодовый. При дальнейшем увеличении мощности накачки возникают биения в районе 15 ГГц, что связано с переключением режима генерации с двухмодового режима в трёхмодовый. Можно предположить, что на частоте в 28 ГГц также должны наблюдаться биения, однако данная частота выходит за диапазон измерения ВЧ-анализатора.

В данной работе был исследован волоконный лазер, работающий как в двух-, так и трёхмодовом режимах, которые переключались в зависимости от мощности накачки. При его работе наблюдали ВЧ-биения на частотах 11, 13, 15 и 25 ГГц, и их дрейф в зависимости от мощности накачки. При подборе положения контролера поляризации удавалось погасить поляризационные биения. Рассчитанная по основным частотам биений эффективная длина резонатора составила около 7,5 мм. Дрейф частоты биений, а также модовые перескоки могут быть обусловлены температурным расширением волокна и, как следствие, изменением эффективной длины резонатора.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Цветкову В.Б. за помощь в исследованиях и обсуждение результатов.

1. Li-Yang Shao et al. Photonics Technology Letters, IEEE, 2007, **19**, 1598–1600.
2. Y.-N. Tan et al. Opt. Express, 2011, **19**(21), 20650–20656.
3. M.Yu. Koptev et al. Photonics. 2022, **9**, 760.

# КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Влияние примеси на поверхностный электронный транспорт в $R_{0,02}Sm_{0,98}B_6$ ( $R$ — Eu, Gd, Yb)

Журкин В.С.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [dok5555@mail.ru](mailto:dok5555@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-66-68

Гексаборид самария является системой с промежуточно валентным состоянием ионов самария ( $v \approx 2,6$ ), которое приводит к частичной делокализации  $4f$ -состояний, флуктуациям заряда и магнитного момента. Из-за инверсного расположения зон  $SmB_6$  относят к топологическим Кондо изоляторам (ТКИ) [1]. Согласно модели ТКИ конечная проводимость  $SmB_6$  определяется поверхностными состояниями электронов с дираковским спектром, возникающими из-за нетривиальной топологии зонной структуры. Однако влияние свойств поверхности  $SmB_6$  на параметры этих состояний, включая составы с различными магнитными/немагнитными примесями, в настоящее время недостаточно изучено.

В представленной работе выполнены исследования поверхностного электронного транспорта в твёрдых растворах замещения на основе  $SmB_6$  с общей формулой  $R_{0,02}Sm_{0,98}B_6$  ( $R$  — Eu, Gd, Yb). Грани образцов полировали при помощи алмазного абразива с последовательным уменьшением зернистости (вплоть до 0,3 мкм). Затем измеряли удельное сопротивление  $\rho$  и коэффициент Холла  $R_H$  в диапазоне температур 1,7–300 К в магнитных полях до 8 Тл. На следующем этапе поверхность подвергалась травлению в водном растворе  $HNO_3$  [2, 3], после чего измерения проводились повторно.

Обнаружено, что электрофизические свойства  $R_{0,02}Sm_{0,98}B_6$ , включая коэффициент Холла и удельное сопротивление, сильно зависят от способа обработки поверхности в случае соединений с двухвалентной магнитной ( $Eu^{2+}$ ) и немагнитной ( $Yb^{2+}$ ) примесью (рис. 1). Для указанных соединений после травления коэффициент

Холла растет примерно на порядок в низкотемпературном пределе. Для трехвалентной примеси ( $Gd^{3+}$ ) зависимости  $\rho(T)$ , полученные на травленых и полированных образцах, практически совпадают, что указывает на доминирующий вклад объёмного электронного транспорта. Отметим, что в случае легирования ( $Gd^{3+}$ ) магнитосопротивление для травленых образцов оказывается меньше, чем для полированных (рис. 2), что принципиально отличает  $Gd_{0,02}Sm_{0,98}B_6$  от остальных представителей ряда  $R_{0,02}Sm_{0,98}B_6$ . Положительное магнитосопротивление наблюдается только для образца с двухвалентной магнитной ( $Eu^{2+}$ ) примесью в случае механической полировки поверхности.

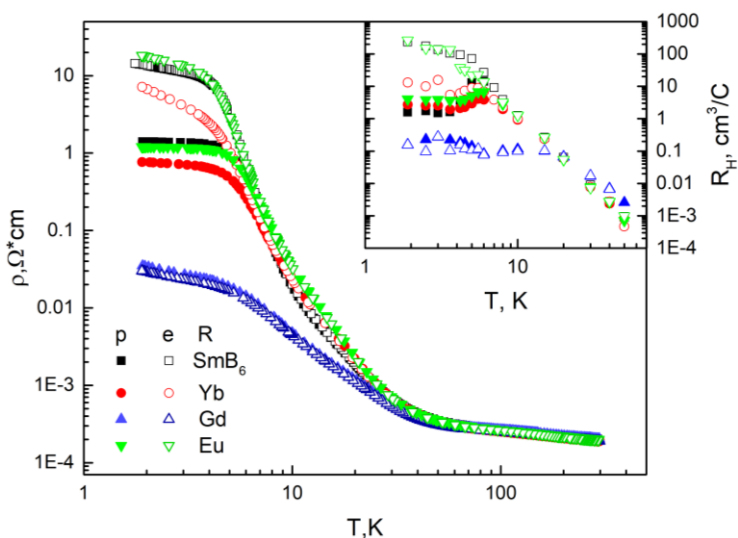


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления  $R_{0,02}Sm_{0,98}B_6$  ( $R$  —  $Eu$ ,  $Gd$ ,  $Yb$ ), рассчитанные для травленых ( $e$ ) и полированных ( $p$ ) образцов. На вставке показаны температурные зависимости коэффициента Холла.

Следует отметить, что травление  $Eu_{0,02}Sm_{0,98}B_6$  качественно меняет характер кривой магнитосопротивления при низких температурах. Несмотря на рост удельного сопротивления после травления, сходство данных для  $Gd_{0,02}Sm_{0,98}B_6$  и  $Eu_{0,02}Sm_{0,98}B_6$  показывает, что ( $Eu^{2+}$ ) подавляет поверхностную проводимость. Это согласуется с моделью топологического изолятора, в котором

магнитная примесь открывает канал рассеяния для поверхностных носителей заряда. В этой ситуации удельное сопротивление  $\text{Eu}_{0,02}\text{Sm}_{0,98}\text{B}_6$  определяется объемным вкладом.

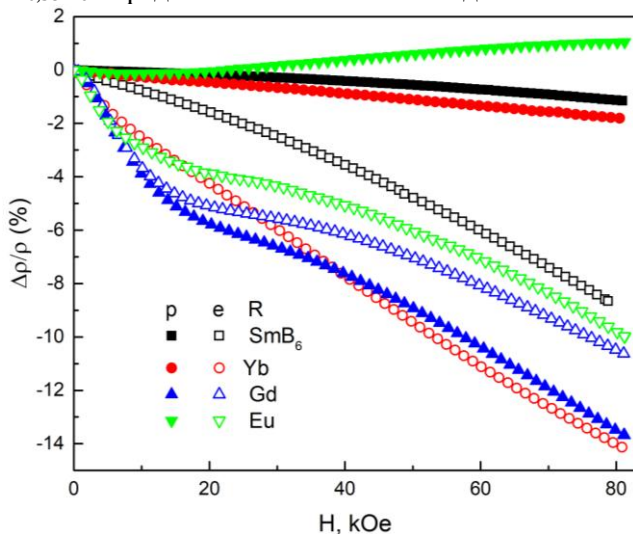


Рис. 2. Полевые зависимости магнитосопротивления  $\text{R}_{0,02}\text{Sm}_{0,98}\text{B}_6$  ( $R$  –  $\text{Eu}$ ,  $\text{Gd}$ ,  $\text{Yb}$ ), полученные для травленных ( $e$ ) и полированных ( $p$ ) образцов при  $T=1,9$  К.

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего изучения эффектов, вызванных изгибом зон под влиянием потенциала поверхности, а также возможной эволюции структуры спектра возбуждений ТКИ, обусловленной влиянием зарядовых флуктуаций.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Глушкову В.В., Божко А.Д., Анисимову М.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, гранта № 22-22-00990, <https://rscf.ru/project/22-22-00990/>.

1. M. Dzero et al., Phys. Rev. Lett. 2010. **104**, 106408.
2. В. Глушков и др., Письма в ЖЭТФ. 2022, **116**, 770.
3. M. Anisimov et al., Solid State Sciences. 2024, **152**, 107546.

## Электропроводность титан-углеродных нанокompозитов

**Коледов М.А.<sup>1</sup>, Нехаева П.А.<sup>1,2</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Факультет наук о материалах, Москва*

E-mail: [koledovq@mail.ru](mailto:koledovq@mail.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-69-71

Металл-диэлектрические нанокompозиты в настоящее время вызывают значительный интерес как материалы с большим потенциалом для практического использования. Они находят применение в создании датчиков различного типа, включая датчики температуры, напряжения, газа и влажности, а также био- и электрохимические датчики [1]. В свою очередь металл-углеродные нанокompозиты, как частный случай металл-диэлектрических нанокompозитов, также представляют собой уникальные соединения для изучения свойств сильно неупорядоченных гранулированных материалов. В этих системах наблюдается сложное взаимодействие множества физических процессов, таких как зарядовые эффекты на уровне отдельных гранул, кулоновские взаимодействия между электронами, а также туннелирование электронов через диэлектрическую матрицу между гранулами и другие явления. Эти факторы оказывают значительное влияние на характер переноса электронов в металл-углеродных нанокompозитных материалах [2].

Целью настоящей работы является изучение механизмов электронного переноса в титан-углеродных нанокompозитах в интервале температур 4,2–300 К в диапазоне концентраций Ti 0,15–0,4 (здесь и далее указаны молярные доли). Плёнки титан-углеродных нанокompозитов толщиной ~1 мкм выращивались на полированных ситалловых подложках с использованием технологии комбинированного осаждения. Аморфная углеродная матрица осаждалась разложением метана в высокочастотном (ВЧ) разряде (13,56 МГц). Металл вводился в растущую плёнку путем распыления титановой мишени в магнетроне постоянного тока.

Для исследования проводимости плёнки подвергали травлению в четырёхконтактной геометрии в аргоновой плазме ВЧ (13,56 МГц) разряда с использованием металлической прижимной маски. Проводимость плёнок на линейных участках вольт-амперных

характеристик измеряли четырёхконтактным способом на переменном токе с частотой 77 Гц. Контакты на поверхности образцов создавали нанесением токопроводящей серебрянной пасты.

На рис. 1 представлены температурные зависимости нормированных проводимостей  $\Sigma(T)/\Sigma(300)$  металл-углеродных нанокомпозитов, где  $\Sigma(300)$  — проводимость при температуре 300 К. Для всех кривых  $\Sigma(T)/\Sigma(300)$  характерно понижение проводимости с уменьшением температуры, причём относительное изменение проводимости падает с ростом концентрации металла. Сравнение производных проводимости по температуре позволило обнаружить тонкую структуру зависимости проводимости от температуры, выражающуюся в существовании двух интервалов температур 100–300 К (интервал 1) и 10–25 К (интервал 2), в каждом из которых проводимость изменяется по степенному закону  $\Sigma(T)/\Sigma(300) \sim T^p$ .

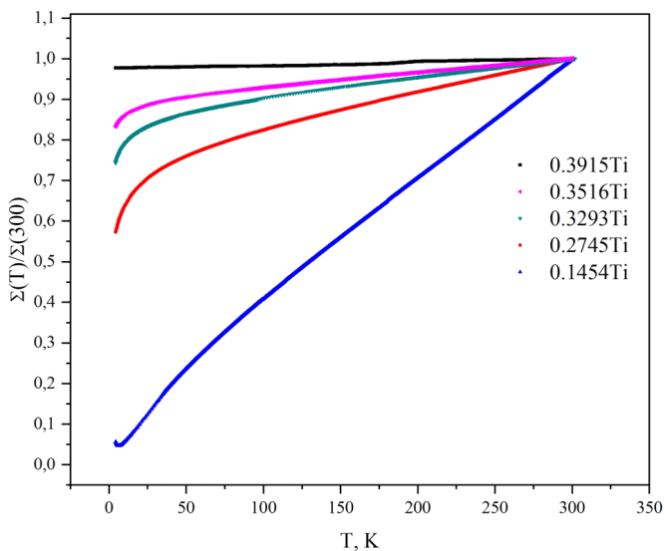


Рис. 1. Нормированные проводимости  $\Sigma(T)/\Sigma(300)$  металл-углеродных нанокомпозитов для различных концентраций титана

Показатель степени для интервала 1 (100–300 К) немонотонно зависит от концентрации Ti, достигая минимума  $p \sim 0,7$  при концентрации титана 0,3, что заметно превышает порог протекания для трёхмерной системы 0,2–0,22 (рис. 2). Напротив, для интервала 2

$p$  монотонно уменьшается от значения  $p \sim 0,41$  ( $x(\text{Ti}) = 0,1454$ ) до значений  $p < 0,05$  для  $x(\text{Ti}) > 0,35$  без явно выраженных особенностей. Подобное поведение температурных зависимостей проводимости позволяет сделать вывод о влиянии концентрации Ti на структуру и проводящие свойства углеродной фазы в титан-углеродных наноккомпозитах и о доминирующем вкладе неупругого туннелирования электронов в зарядовый транспорт при низких температурах [3].

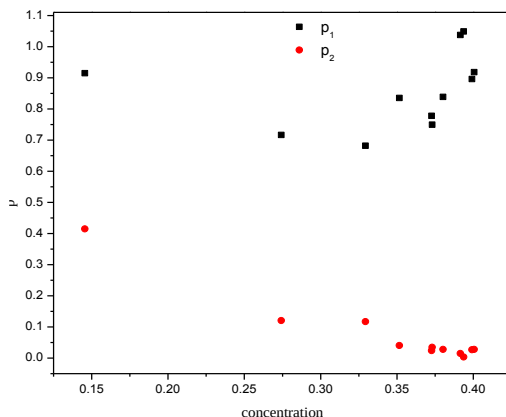


Рис. 2. Значения показателя  $p$  степенной зависимости проводимости образцов  $\Sigma(T) \sim T^p$  от концентрации титана для температурных интервалов (1) и (2) (см. текст)

Авторы выражают благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Божко А.Д. за постановку задачи, помощь в измерениях и обсуждение полученных результатов.

1. W.-D. Lin, T.-C. Chang, R.-J. Wu, Sensor. Mater. 2018, **30**, 1297–1306.
2. I.S. Beloborodov, A.V. Lopatin, V.M. Vinokur, K.B. Efetov, Rev. Mod. Phys. 2007, **79**, 469–518.
3. A.D. Bozhko, D.E. Bortyakov, V.V. Brazhkin, et al. Physica B. 2021, **610**, 412680.



## Тонкие пленки CdTe на подложках из кремния и сапфира: напыление и характеристика

**Кошелев И.О., Волчков И.С., Подкур П.Л., Хайретдинова Д.Р.,  
Долуденко И.М.**

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова  
Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

E-mail: [iliakoscheff@yandex.ru](mailto:iliakoscheff@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-72-74

Теллурид кадмия CdTe является представителем класса широкозонных полупроводников и выделяется по целому ряду свойств. Теллурид кадмия имеет оптимальную ширину запрещенной зоны  $E=1,5$  эВ при  $T=300$  К [1] для прямого преобразования солнечного света в электроэнергию и может обеспечить эффективность  $\sim 32\%$  [2]. Для данных применений используются наноструктурные образцы, такие как эпитаксиальные тонкие плёнки на различных кристаллических подложках (Si, GaAs,  $Al_2O_3$  и др.). Для получения высокосовершенных тонких плёнок представляет интерес метод термического напыления из газовой фазы. В данной работе проведены исследования состава и структуры тонких плёнок CdTe, выращенных на подложках Si (111) и  $Al_2O_3$  (0001) на лабораторной установке методом высоковакуумного термического напыления. Процесс проходил в условиях вакуума ( $\sim 10^{-8}$ – $10^{-7}$  мбар). Подложки Si и  $Al_2O_3$  нагревали до температуры  $\sim 250$  °С. Температура источника в обоих процессах составляла 673 °С. Время напыления — 60 мин. Фазовый состав выращенных образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском порошковом дифрактометре X'Pert Pro PANalytical MPD (Нидерланды,  $Cu_{K\alpha}$ -излучение,  $\lambda=0,154$  нм) Диапазон углов  $2\theta=20^\circ$ – $80^\circ$ . Элементное соотношение Cd к Te по длине образца определяли методом энергодисперсионной спектроскопии на растровом электронном микроскопе JCM-6000 PLUS (Jeol, Япония) со встроенной энергодисперсионной приставкой.

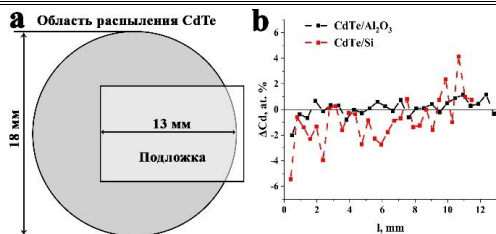


Рис. 1, а) Область распыления CdTe, относительно подложки;  
б) Соотношение Cd и Te на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и Si.

Расположение подложки относительно области распыления CdTe в установке термического напыления представлено на рис. 1а. Выращенные образцы тонких плёнок CdTe показали соотношение элементов Cd к Te, близкое к стехиометрии (рис. 1б). Образец, выращенный на подложке Si, имел большее отклонение от стехиометрии по длине образца по сравнению с образцом, выращенным на подложке  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Образцы, выращенные на подложках Si (111) (рис. 2а), обладают двумя пиками кубической фазы типа сфалерита CdTe – (111) и (220). В случае образца, выращенного на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001), наблюдается схожая картина (рис. 2б). При этом наблюдаются пики кубической фазы типа сфалерита CdTe (111), (220) и (222), что соответствует эпитаксиальным плёнкам CdTe, полученным методом молекулярно-лучевой эпитаксии [3].

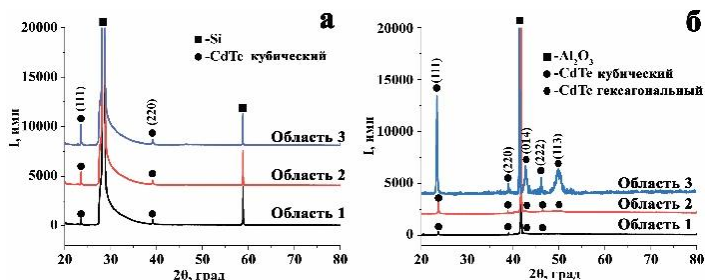


Рис. 2. а) Результаты РФА образцов на Si (111);  
б) Результаты РФА образцов на  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Выращенные тонкие плёнки CdTe на подложках  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) и Si (111) методом термического напыления, имела разный фазовый состав: на сапфире плёнки поликристаллические и состоят из двух

(вюрцитной и сфалеритной) фаз CdTe, а на Si (111) — ориентированные и сфалеритной модификации.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

1. Fonthal G., Tirado-Mejia L., Marín-Hurtado J.I., et al., J. Phys. Chem. Solids. 2000, **61**(2), 579.
2. Rühle S., Sol. Energy. 2016, **130**, 139. .
3. Михайлов В., Буташин А., Каневский В. и др. Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед. 2011, **6**, 97.

## Влияние подсветки на терагерцовую проводимость и время жизни верхнего лазерного уровня иона железа в кристаллах ZnSe

**Миронов С.А.<sup>1</sup>, Сторожевых М.С.<sup>1</sup>, Терентьев А.<sup>2</sup>, Живетьев К.В.<sup>2</sup>**

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

2- Московский физико-технический институт, Москва

E-mail: [sa.mironov@kapella.gpi.ru](mailto:sa.mironov@kapella.gpi.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-75-77

ZnSe:Fe — перспективный полупроводник для создания ИК-лазеров на диапазон 3–5 мкм. Особенностью этого материала является сильная зависимость времени жизни верхнего уровня железа от температуры, которое меняется от 105 мкс при 120°K до 355 нс при 300 K. Такая особенность в литературе объясняется пересечением конфигурационных потенциальных кривых электронных состояний иона  $\text{Fe}^{2+}$  в ZnSe и сильным электрон-фононным взаимодействием [1]. В [2] было показано, что на этот параметр при температуре жидкого азота влияет концентрация электронов в зоне проводимости, за счет Оже-рекомбинации. Обычно сопротивление кристаллов ZnSe:Fe при температуре 300 K, измеренное на постоянном токе превышает десятки МОм. Соответственно, концентрации носителей тока в этих образцах должны быть малы. Однако, если в этих кристаллах образовался потенциальный рельеф, содержащий локализованные носители, то измерения проводимости на постоянном токе не будут определять реальную концентрацию носителей тока в них.

В [3] сообщалось об обнаружении эффекта долговременного роста и релаксации фототока в кристаллах ZnSe:Fe. Эти результаты связывались с образованием в этих кристаллах потенциального рельефа и медленной перезарядкой формирующих его примесно-дефектных центров. Данная работа является продолжением этих экспериментов. В ней исследовались проводимость в терагерцовом диапазоне используемых в [3] кристаллов и влияние на неё и кинетику люминесценции ионов железа подсветки излучением лазерных диодов мощностью несколько мВт в диапазоне 525–870 нм.

Оказалось, что образцы с концентрацией больше 1 % практически полностью поглощают терагерцовое излучение в

диапазоне  $10\text{--}60\text{ cm}^{-1}$ . Уменьшение концентрации железа приводило к уменьшению проводимости в терагерцовом диапазоне. Спектр и величины проводимости образца с концентрацией железа 0,6 % при разных температурах приведены на рис. 1а. Видно, что понижение температуры уменьшает ее величину, причем температурная зависимость в интервале температур  $100\text{--}300$  град хорошо описывается в предположении что происходит «вымораживание» примесных уровней с энергией ионизации  $22\text{--}25\text{ мэВ}$  (рис. 1б). Облучение диодом с длиной волны  $525\text{ нм}$  приводит к значительному возрастанию проводимости в терагерцовом диапазоне.

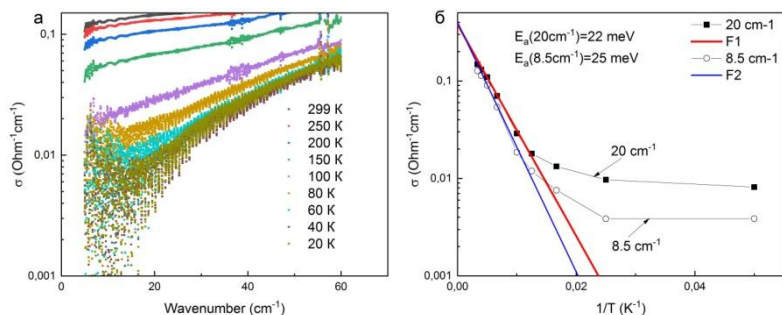


Рис. 1. Спектры проводимости при различных температурах (а) и график зависимости проводимости образцов от обратной температуры (б).

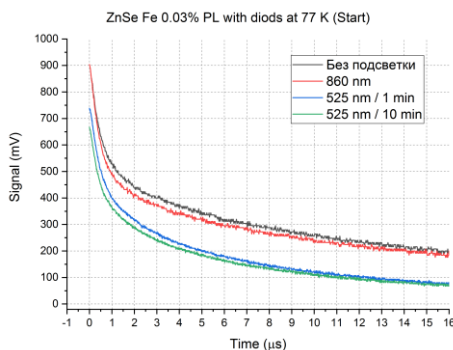


Рис. 2. Кинетики импульсов люминесценции

На рис. 2 приведены кинетики импульсов люминесценции кристаллов с концентрацией железа 0,03 % без и с влиянием подсветки лазерными диодами с длинами волн 525 и 870 нм. Они носят неэкспоненциальный характер. Видно, что подсветка излучением лазерного диода с длиной волны 525 нм влияет на кинетику люминесценции ионов железа, уменьшая время жизни, в то время как с длиной волны 870 нм — не влияет (рис. 2). Предложена модель, согласно которой наблюдаемые эффекты объясняются образованием в результате легирования железом в исследуемых кристаллах крупномасштабного (микронного масштаба) потенциального рельефа.

1. Fedorov V.V., Mirov S.B., Gallian A., et al., IEEE Journal of Quantum Electronics. 2006, **42**(9), 907–917.
2. Ильичев Н.Н., Гладилин А.А., Гулямова Э.С., Квантовая электроника. 2020, **50**(8), 730.
3. Сторожевых М.С., Калинушкин В.П., Уваров О.В. и др. Известия РАН. Серия физическая. 2023, **87**(6), 901–906.

## Статическая и динамическая намагниченность в тройном карбиде $\text{GdCoC}_2$

Тагиров Р.Р.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [robert.tagirov.2013@mail.ru](mailto:robert.tagirov.2013@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-78-79

Высокий интерес к исследованию магнитных топологических материалов обусловлен связанными с магнетизмом и топологией экзотическими физическими явлениями, такими как нетривиальная спиновая текстура и топологическое транспортное поведение.

Тройной карбид  $\text{GdCoC}_2$  кристаллизуется в орторомбической структуре без центра инверсии, что приводит к формированию неколлинеарных магнитных структур и появлению топологического вклада в холловское сопротивление [1]. Кроме этого, в названном соединении наблюдается гигантский магнетокалорический эффект, что делает  $\text{GdCoC}_2$  перспективным для применения в технологиях магнитного охлаждения [2]. Перечисленные особенности стимулируют интерес к более детальному исследованию магнитных свойств  $\text{GdCoC}_2$ . В настоящей работе выполнено исследование статических и динамических магнитных свойств этого материала с помощью измерения намагниченности и электронного спинового резонанса (ЭСР).

Поликристаллические образцы  $\text{GdCoC}_2$  были получены в тороидальной камере высокого давления при давлениях  $P=8$  ГПа и температурах  $T=1500\text{--}1700$  К в ИФВД РАН. Намагниченность  $\text{GdCoC}_2$  измерялась с помощью магнитометра MPMS-5 (Quantum Design) в ИОФ РАН. Получены температурные и полевые зависимости в диапазоне температур  $2\text{--}350$  К в полях до 5 Тл. Измерения ЭСР проводились на спектрометре, созданном на основе анализатора цепей Agilent (ИОФ РАН). Исследуемый образец ( $l < 0,5$  мм)  $\text{GdCoC}_2$  помещался в цилиндрический резонатор, работающий на резонансной моде  $\text{TE}_{011}$  на частоте  $f=60$  ГГц. Получены спектры резонансного поглощения в диапазоне температур  $2\text{--}260$  К.

Магнитные свойства этого соединения обусловлены ферромагнитным взаимодействием внутри двух подсистем:

$f$ -электронов Gd и  $d$ -зоны Co, а также  $f-d$  ферромагнитным взаимодействием. Анализ намагниченности позволил выделить на полевых зависимостях  $M(B)$  ферромагнитный вклад, который наблюдается до самых высоких температур  $T > 350$  К. Этот вклад обусловлен, по-видимому, зонным магнетизмом Co, и величина этого вклада ( $\sim 0,5$   $\mu_B$  на формульную единицу (ф.е.),  $\mu_B$  — магнетон Бора) слабо зависит от температуры. Подсистема ионов  $Gd^{3+}$  демонстрирует ферромагнитное поведение с критической температурой  $T_C \approx 15$  К. Момент насыщения  $GdCoC_2$  при  $T = 2$  К составляет  $\approx 5,7$   $\mu_B$ /ф.е.

Обнаружено, что спектр ЭСР в  $GdCoC_2$  состоит из двух резонансных линий. Одна из линий с небольшой интенсивностью, слабо зависящей от температуры, и  $g$ -фактором ( $g \approx 2,2$ ), обусловлена резонансом на ионах кобальта. Вторая линия, с  $g$ -фактором ( $g \approx 2$ ), интенсивность которой сильно растёт с понижением температуры, обусловлена подсистемой ионов  $Gd^{3+}$ . Таким образом, данные ЭСР качественно согласуются с результатами магнитных измерений. Интересно, что ширина резонансной линии ионов  $Gd^{3+}$  сильно растёт ниже  $T_C$ , что может свидетельствовать о росте спиновых флуктуаций в ферромагнитной фазе  $GdCoC_2$ .

Автор выражает благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Семенову А.В. за постановку задачи, помощь в измерениях и обсуждение полученных результатов.

1. Yang Xu, Wei Ren, Shengcan Ma, et al., Appl. Phys. Lett. 2023, **123**, 072402.
2. Lingjian Meng, Chi Xu, et al., RSC Adv. 2016, **6**, 74765.



**Лазерная спектральная селекция  
оптических тетрагональных центров иона  $\text{Er}^{3+}$   
на переходе  ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$  в кристаллах  $\text{CaF}_2:x\% \text{Er}^{3+}$   
при низкой температуре**

**Тимофеева Е.Э.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [elena16051997@mail.ru](mailto:elena16051997@mail.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-80-82

Целью исследования было определение типа оптических центров (о.ц.), к которым принадлежат спектральные линии возбуждения и излучения люминесценции на переходе  ${}^4\text{I}_{15/2} \rightleftharpoons {}^4\text{I}_{9/2}$  в монокристаллах  $\text{CaF}_2:x\% \text{Er}^{3+}$  с разной концентрацией  $\text{Er}^{3+}$ .

Фундаментальные исследования люминесценции перехода  ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  важны в связи с перспективой его применения для управления штарковской блокадой в квантовом венти́ле CNOT для сверхбыстрых квантовых компьютеров, основанных на примесных редкоземельных ионах в легированных кристаллах [1]. Одновременно штарковский уровень  ${}^4\text{I}_{9/2}(1)$  является состоянием  $|0\rangle$  кубита, где состоянием  $|1\rangle$  является метастабильный штарковский уровень  ${}^4\text{S}_{3/2}(1)$ , а управляющим состоянием – нижнее штарковское состояние основного мультиплета  ${}^4\text{I}_{15/2}(1)$ .

Для тетрагонального о.ц. были измерены спектры возбуждения и испускания люминесценции (рис. 1).

Они имеют существенное неоднородное уширение, что принципиально для осуществления штарковской блокады [1].

Также были измерены кривые затухания люминесценции со штарковского уровня  ${}^4\text{I}_{9/2}(1)$  для концентрационной серии кристаллов  $\text{CaF}_2:x\% \text{Er}^{3+}$  ( $x=0,03\text{--}0,5\% \text{Er}^{3+}$ ) при  $T = 6,6\text{ K}$  и определено его время жизни, равное  $7,4 \pm 0,1\text{ мкс}$  (рис. 2). Оно оказалось в 2 раза короче, измеренного в работе [3] для кристалла  $\text{CaF}_2: 0,5\% \text{Er}^{3+}$  при  $T=77\text{ K}$  без спектральной селекции по люминесценции ( $\tau=14,0\text{ мкс}$ ). Это время определяется скоростью многофононной релаксации.

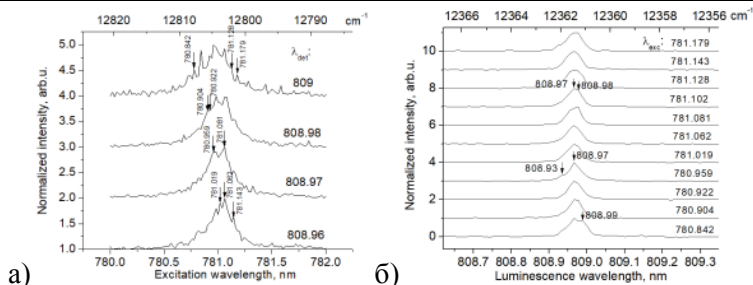


Рис. 1. а) Селективные спектры возбуждения люминесценции тетрагонального о.ц. в кристалле  $0,03\% \text{Er}^{3+} : \text{CaF}_2$  при  $T = 6,6 \text{ K}$  на переходе  $^4\text{I}_{9/2}(1) \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}(1)$  при разных длинах волн регистрации люминесценции. б) Селективные спектры люминесценции на переходе  $^4\text{I}_{9/2}(1) \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}(6)$  того же о.ц., измеренные при разных длинах волн возбуждения, отмеченных на рис. а.

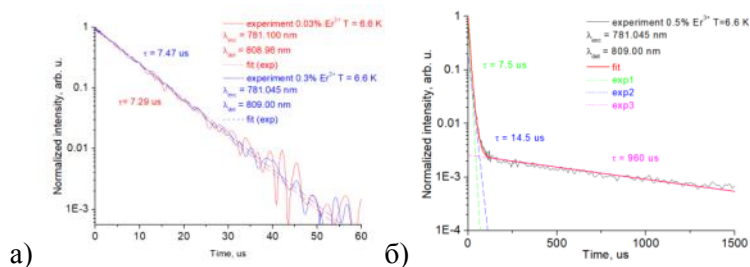


Рис. 2. Кривые затухания люминесценции для а)  $\text{CaF}_2:0,03\% \text{Er}^{3+}$  и  $\text{CaF}_2:0,3\% \text{Er}^{3+}$ ; б)  $\text{CaF}_2:0,5\% \text{Er}^{3+}$ . Параметры измерения представлены в легенде на рисунках.

Для верификации возбуждения именно тетрагонального о.ц.  $\text{Ca}_v$  производилась регистрация спектра люминесценции на переходе  $^4\text{S}_{3/2}(1) \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}(1)$  и кинетики затухания люминесценции штарковского уровня  $^4\text{S}_{3/2}(1)$  в кристалле  $\text{CaF}_2:0,03\% \text{Er}^{3+}$  при  $T=77 \text{ K}$  в результате его апконверсионного возбуждения на переходе  $^4\text{I}_{15/2}(1) \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}(1)$  с последующим поглощением второго фотона из возбужденного состояния. По литературным данным время жизни уровня  $^4\text{S}_{3/2}$  для тетрагонального о.ц. в кристалле  $\text{CaF}_2:\text{Er}^{3+}$  варьируется от 1,3 до 1,5 мс в зависимости от концентрации [2]. Полученное время жизни 1516 мкс совпадает с литературным значением ( $\tau=1524 \text{ мкс}$ ) при концентрации иона эрбия, равной 0,01 мол.%. В Таблице 1

представлены результаты измерения времен жизни, полученных в ходе анализа измеренных кривых затухания люминесценции для данной концентрационной серии кристаллов, и приведена идентификация о.ц. по литературным данным времен жизни для разных типов центров. Время жизни равное 14,5 мкс уровня  $^4I_{9/2}$  иона  $Er^{3+}$ , по-видимому, принадлежит нететрагональному одиночному о.ц. и соответствует результату, полученному в ранней работе [3].

Таблица 1. Времена жизни для кривых затухания люминесценции уровней  $^4S_{3/2}$  и  $^4I_{9/2}$  иона  $Er^{3+}$  в кристаллах  $CaF_2:x \%Er^{3+}$  при различных концентрациях эрбия.

| Концентрация ионов $Er^{3+}$ x, мол% | Температура T, К | Длина волны, нм             |                             | Время жизни, мкс                   |                                      |                        | Примечания                 |
|--------------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------------|
|                                      |                  | возбуждения $\lambda_{exc}$ | регистрации $\lambda_{det}$ | $^4I_{9/2}$ ( $C_{4v}$ ), $\tau_1$ | $^4I_{9/2}$ (не $C_{4v}$ ), $\tau_2$ | $^4S_{3/2}$ , $\tau_3$ |                            |
| 0,03                                 | 6,6              | 781,1                       | 808,96                      | 7,3                                | —                                    | 3500                   | (псевдокуб)[2]<br>$C_{4v}$ |
|                                      | 77               |                             | 551,3                       | —                                  | —                                    | 1516                   |                            |
| 0,3                                  | 6,6              | 781,045                     | 809                         | 7,5                                | —                                    | —                      | —                          |
| 0,5                                  | 6,6              | 780,88                      | 805,14                      | 7,3                                | 13                                   | 955                    | (тригональный)[2]          |
|                                      |                  |                             | 808,19                      | 7,5                                | 14,5                                 | 960                    | (тригональный)[2]          |
|                                      |                  |                             | 838,333                     | 7,4                                | 17                                   | 700                    | (кластер)[2]               |

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Орловскому Ю.В. за постановку научной задачи и обсуждение результатов, к.ф.-м.н. Попову А.В. и к.ф.-м.н. Долгову Л.Ч. за помощь в измерениях, и д.ф.-м.н. Хижнякову В.В. за теоретическую поддержку.

1. Hizhnyakov V., Boltrushko V., Kaasik H., Orlovskii Yu., Opt. Comm., 2021, **485**, 126693.
2. Tallant D.R., Moore D.S., Wright J.C., J. Chem. Phys., 1977, **67**, 2897.
3. Orlovskii Yu.V., Basiev T.T., Pukhov K.K., et. al., J. Lumin., 2001, **94/95**, 791–795.

## Формирование сингулярностей типа ван Хова при распространении волнового поля в одномерной стратифицированной среде

**Волкова В.В., Кулагина М.А., Филатов В.В.**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

*E-mail: [vyfilatov@bmstu.ru](mailto:vyfilatov@bmstu.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-83-85

В настоящее время большой практический интерес вызывает изучение динамики волновых полей в неоднородных средах. Так, распространение гармонической волны в стратифицированной среде сопровождается переотражениями на границах неоднородностей, поэтому уже в одномерном случае имеется возможность локализации поля, приводящая к накачке [1]. При этом в функции плотности состояний соответствующих квазичастиц в пространстве квазиимпульсов возникает резонанс – сингулярность (особенность) типа ван Хова [2]. Настоящая работа посвящена выяснению условий возникновения ванхововских сингулярностей в полях произвольной природы при распространении в одномерных стратифицированных средах.

Для общности описания будем обозначать амплитуду поля символом  $\Psi(\mathbf{r}, t)$ . В этом случае распространение  $\Psi$ -волны вдоль выбранного направления ( $Ox$ ) описывается волновым уравнением

$$\partial^2 \Psi / \partial t^2 = u^2 \partial^2 \Psi / \partial x^2, \quad (1)$$

в котором  $u = u(x)$  есть скорость движения волнового фронта.

Решение (1) в каждом ( $j$ -м) слое стратифицированной среды может быть представлено в виде падающей и отраженной волн:

$$\Psi_j(x, t) = A_j \exp[i(k_j x - \omega t)] + B_j \exp[-i(k_j x + \omega t)], \quad (2)$$

где  $\omega$  — циклическая частота, а  $k_j = \omega/u_j$  — волновое число.

Заметим, что максимальное интерференционное усиление  $\Psi$  может быть получено лишь в результате «синхронизации» всех слоев композита, поэтому для целей настоящего исследования следует сузить рассмотрение всех мыслимых плоскостойких сред периодическими. Простейшая из них (за исключением тривиальных)

– одномерная двукомпонентная, образованная последовательным чередованием двух подслоев («1» и «2»): (1,2),(1,2),(1,2)...

Вытекающие из вида уравнения (1) требования непрерывности и гладкости (2) на стыках подслоев, а также условие периодичности приводят к следующему равенству:

$$\cos ka = \cos k_1 a_1 \times \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \times (k_1/k_2 + k_2/k_1) \times \sin k_1 a_1 \times \sin k_2 a_2, \quad (3)$$

где  $k_1 \equiv k_j^{(1)}, \quad k_2 \equiv k_j^{(2)},$

$$a_1 \equiv x_{j+1/2} - x_j, \quad a_2 \equiv x_{j+1} - x_{j+1/2},$$

$$a_j^{(1)} \equiv A_j^{(1)} \exp(ik_j^{(1)} x_j), \quad a_j^{(2)} \equiv A_j^{(2)} \exp(ik_j^{(2)} x_{j+1/2}),$$

$$b_j^{(1)} \equiv B_j^{(1)} \exp(-ik_j^{(1)} x_j), \quad b_j^{(2)} \equiv B_j^{(2)} \exp(-ik_j^{(2)} x_{j+1/2}),$$

а  $x_{j+1/2}$  и  $x_{j+1}$  суть координаты внутреннего (в пределах слоя  $j$ ) и внешнего (на границе  $j$ -го и  $(j+1)$ -го слоев) стыков подслоев «1» и «2», обозначенных верхним индексом в скобках.

Как хорошо видно из (3), спектр решений данного уравнения содержит «запрещённые зоны» – области частот, для которых правая часть (3) по абсолютной величине превышает единицу, вследствие чего решения (3) не существует. Границы запрещённых зон определяются условием

$$\cos ka = \pm 1, \quad (4)$$

что в первой зоне Бриллюэна соответствует центру ( $k = 0$ ) или краю ( $k = \pi/a$ ). В указанных точках происходит переход из «запрещённой» области в «разрешённую», и волны впервые получают возможность распространяться в материале, но на самой границе зон групповая скорость  $\Psi$ -волны нулевая:

$$v(\omega) = 0, \quad (5)$$

что обуславливает резонанс функции плотности одночастичных состояний в одномерном «кристалле» ( $V$  – его объем):

$$\begin{aligned} \rho(\omega) &= [V/(2\pi)^3] \times \int dS_k / |\nabla_k \omega| = \\ &= (V/2\pi^2) \times k^2 \times |dk/d\omega| \sim dk/d\omega = v^{-1} \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (6)$$

Это и есть искомая сингулярность ван Хова.

Таким образом, в одномерных стратифицированных средах сингулярности типа ван Хова образуются в критических точках зоны Бриллюэна, то есть, на краях ячейки Вигнера-Зейтца в обратном пространстве. С очевидностью полученный результат обобщается на

случаи дву- и трёхмерных структур. Отметим, что представленный вывод получен в рамках самых общих предположений и не зависит от природы поля, что открывает возможности локализации, накачки и последующей когерентной генерации в произвольных полях.

1. Пичкуренок С.В., Филатов В.В., Ядерная физика и инжиниринг. 2018, **9**(6), 582–584.
2. van Hove L., Phys. Rev. 1953, **89**, 1189–1193.

## Структурная аномалия в жидких пниктогенах: DFT анализ сурьмы

**Цыганков А.А.<sup>1,2</sup>, Галимзянов Б.Н.<sup>1,2</sup>**

1- Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

2- Федеральный исследовательский центр

Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск

E-mail: [tsigankov.artiom@yandex.ru](mailto:tsigankov.artiom@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-86-87

Жидкости часто характеризуются наличием однородного распределения атомов на больших расстояниях и ближним порядком на малых расстояниях. Однако жидкая сурьма является необычной системой из-за своей структуры, которая демонстрирует аномалии в виде плеч в функции радиального распределения и статического структурного фактора [1, 2]. Причина существования этой аномалии еще не понятна полностью [3, 4]. Функция радиального распределения — это характеристика вероятности нахождения атома на определенном расстоянии от другого. Отсюда следует, что эта особенность может проявиться только в том случае, если атомы образуют хотя бы квазистабильные связанные структуры [4]. Для воспроизведения структурных особенностей жидкой сурьмы было проведено *ab initio* моделирование молекулярной динамики используя методы теории функционала плотности (DFT) при температуре  $T = 923$  К и давлении  $P = 1,0$  атм [5].

Для определения возможности существования стабильных структур в жидкой сурьме из полученных результатов *ab initio* моделирования молекулярной динамики было рассчитано распределение частиц по временам соседства. В рамках модели Вильямса-Ланделя-Ферри было показано, что в областях, ограниченных сферой радиуса  $5 \text{ \AA}$ , существуют стабильные образования с временем жизни более  $1,6 \text{ пс}$  [6]. Для идентификации таких структур были оценены параметры порядка  $q_4$  и  $q_6$  и была проведена характеристика структур [7, 8]. Результаты показали наличие треугольных структур с длинами  $a=3,07 \text{ \AA}$ ,  $b=4,7 \text{ \AA}$  и углами  $\alpha=45^\circ$  а  $\beta=90^\circ$  в жидкой сурьме (рис. 1). Кроме того, найденные квазистабильные образования оказывают непосредственное влияние на наличие плеча в функции радиального распределения и статического структурного фактора [9].

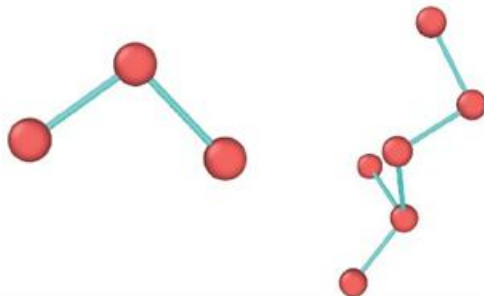


Рисунок 1. Пример треугольной структуры и цепочки, сформированной атомами сурьмы.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Мокшину А.В. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета ("ПРИОРИТЕТ-2030").

1. Waseda Y., Suzuki K., *Physica Status Solidi (b)*. 1972, **49**, 339–347.
2. Greenberg Y., Yahel E., Caspi E.N. et al., *J. Chem. Phys.* 2010, **133**, 094506-1-094506-8.
3. Yang M., Trizio E., Parinello M., *Chem. Sci.*, 2024, **15**, 3382–3392.
4. Jones R.O., Ahlstedt O., Akola J., et al., *J. Chem. Phys.*, 2017, **146**, 194502-1-194502-10.
5. Kresse G., Hafner J., *Phys. Rev. B*. 1993, **47**, 558–561.
6. Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D., *J. Am. Chem. Soc.*, 1955, **77**, 3701–3707.
7. Steinhardt P.J., Nelson D.R., Ronchetti M., *Phys. Rev. B.*, 1983, **28**, 784–805.
8. Tsygankov A.A., Galimzyanov B.N., Mokshin A.V., *High Energy Chemistry*. 2023, **57**, S243–S246.
9. Tsygankov A.A., Galimzyanov B.N., Mokshin A.V., et al., *Scripta Materialia*, 2023, 235, 115618.



# НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И НАНОСТРУКТУРЫ

## Спектроскопия ионов эрбия, тулия и гольмия в новых оксохлоридных свинцово-теллуридных стёклах

**Бутенков Д.А.<sup>1</sup>, Василенкова А.М.<sup>1</sup>, Бакаева А.В.<sup>1</sup>, Рунина К.И.<sup>1</sup>,  
Veselský K.<sup>2,3</sup>, Loiko P.<sup>2</sup>, Braud A.<sup>2</sup>, Camy P.<sup>2</sup>**

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

2- *Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP),*

*UMR 6252 CEA-CNRS-ENSICAEN, Université de Caen Normandie*

3- *Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague*

E-mail: [dabutenkov@gmail.com](mailto:dabutenkov@gmail.com)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-88-90

Решение ряда практических задач: газовая сенсорика, лазерная хирургия и передача информации в «окнах прозрачности» атмосферы делают актуальными поиск и разработку материалов инфракрасного спектрального диапазона. Легированные редкоземельными ионами стёкла на основе диоксида теллура рассматриваются как перспективные среды для решения вышеупомянутых задач [1]. В представленном исследовании мы изучали спектрально-люминесцентные свойства стёкол  $\text{PbCl}_2\text{--TeO}_2$ , легированных ионами эрбия ( $\text{Er}^{3+}$ ), тулия ( $\text{Tm}^{3+}$ ) и гольмия ( $\text{Ho}^{3+}$ ).

Стёкла синтезировали по традиционной методике закалки расплава. Шихты массой 20 г плавил в корундовых тиглях с крышкой в муфельной печи. После выдержки при 800 °С в течение 30 минут, расплав отливали на стальную плиту. Для спектральных исследований были подготовлены полированные пластинки. Легирование производили замещением части шихты на фториды РЗМ. Мы вводили  $\text{ReF}_3$  ( $\text{Re} = \text{Er}, \text{Tm}, \text{Ho}$ ) в двух концентрациях: 0,65 и 2 мол.%. Спектры комбинационного рассеяния света регистрировали на спектрометре Bruker Vertex 70 с модулем комбинационного рассеяния RAM II с диапазоном измерений 3500–0  $\text{см}^{-1}$ . Спектры поглощения образцов снимали на спектрофотометрах JASCO V-770 и Bruker Tensor 27 с диапазоном измерения 0,2–27 мкм. Спектры ИК-люминесценции редкоземельных ионов измерялись на двух оптических анализаторах спектра:

Yokogawa AQ6375 и AQ6376 с использованием перестраиваемого титан-сапфирового лазера в качестве источника возбуждения,  $\text{CaF}_2$  линзы и волокна  $\text{ZrF}_4$  с большим размером сердцевины для сбора света. Кривые затухания люминесценции измерялись с помощью оптического параметрического генератора с наносекундным разрешением (Horizon, Continuum), 1/4 м монохроматора (Oriel 77200), набора InGaAs детекторов и 8 ГГц цифрового осциллографа (DSA70804B, Tektronix).

Введение хлорида свинца в состав теллуридных стёкол приводит к изменению их структуры, что видно в спектрах комбинационного рассеяния (рис. 1(а)). Структурные изменения сопровождаются снижением энергии фононов матрицы и уменьшением скоростей многофононной релаксации ионов-активаторов из возбуждённых состояний. Наименьшей энергией фононов ( $840 \text{ см}^{-1}$ ) обладает состав стекла  $50\text{PbCl}_2\text{--}50\text{TeO}_2$ , который и был выбран в качестве матрицы для легирования РЗМ.

Стёкла проявляют интенсивную люминесценцию в ИК-диапазоне спектра (рис. 1(б-г)). Было зарегистрировано излучение на переходах  ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2} \text{ Er}^{3+}$  ( $\sim 2,7 \text{ мкм}$ ),  ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_5 \text{ Tm}^{3+}$  ( $\sim 2,31 \text{ мкм}$ ) и  ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8 \text{ Ho}^{3+}$  ( $\sim 2 \text{ мкм}$ ). Анализ кинетик затухания люминесценции показывает, что времена жизни возбуждённых состояний в стёклах системы  $\text{PbCl}_2\text{--TeO}_2$  больше, чем в похожих оксидных системах  $\text{ZnO--La}_2\text{O}_3\text{--TeO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--TeO}_2$  и  $\text{WO}_3\text{--TeO}_2$  [1, 2]. Однако, времена жизни меньше чем в чисто галогенидных системах: кристаллах  $\text{PbF}_2$  и стёклах ZBLAN [3–5].

Таким образом, впервые в мире получена люминесценция в среднем ИК-диапазоне в оксохлоридных аморфных матрицах. На характер затухания люминесценции сильно влияет содержание остаточных ОН-групп в стекле и концентрация легирующей добавки. Анализ спектрально-люминесцентных характеристик позволяет сделать вывод, что синтезированные стёкла перспективны для лазерных применений в области  $2\div 3 \text{ мкм}$ .

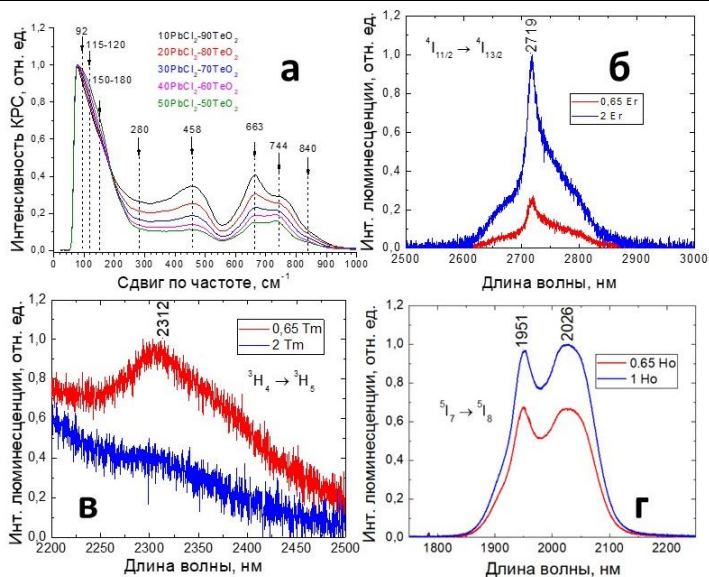


Рис. 1. Спектральные характеристики стёкол: а — спектры комбинационного рассеяния; б, в, г — спектры люминесценции.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.х.н. Петровой О.Б. за постановку научной задачи, помощь в обсуждение результатов и бесконечный заряжающий оптимизм.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы УМНИК (договор № 18370ГУ/2023).

1. Denker B.I. et al., J. Ap. Phys. B. 2018, **124**, 1–8.
2. Topper B. et al., Opt. Mat. Exp. 2023, **13**(10), 2857–2868.
3. Guillemot L., Loiko P. et al., J. Opt. Ex. 2022, **30**(18), 31669–31684.
4. Gan H. et al., J. Alloys and Comp. 2021, **865**, 158170.
5. Liao J. et al., Crystals. 2021, **11**(9), 1024.

## Новая матрица для ап-конверсии

**Волчек А.А.<sup>1</sup>, Александров А.А.<sup>1,2</sup>**

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

2- Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова

Российской академии наук, Москва

E-mail: [angelina.vol4ek@yandex.ru](mailto:angelina.vol4ek@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-91-92

Физико-химические свойства и структуры бинарных систем  $\text{BaF}_2\text{--LnF}_3$  и  $\text{NaF--LnF}_3$  (где Ln — редкоземельные элементы) подробно описаны в литературе [1]. Тройные системы фторидов характеризуются широким разнообразием фаз [2]. В сравнении с системой  $\text{NaF--BaF}_2\text{--GdF}_3$  система  $\text{NaF--BaF}_2\text{--YF}_3$  по первичным исследованиям значительно отличаются кристаллическими структурами.

Целью работы было установление фазообразования в системе  $\text{NaF--BaF}_2\text{--YF}_3$  методом твердофазного синтеза. Спекания порошков проводили в никелевых капиллярах при 760 °С, продолжительность выдержки — 295 ч. В качестве фторирующей среды использовался гидрофторид бария. Закаливание производили в жидком азоте.

По данным рентгенофазового анализа (дифрактометр Bruker D8 Advance (излучение  $\text{CuK}_\alpha$ )) в этой системе, помимо твердого раствора на основе фазы  $\text{Ba}_4\text{Y}_3\text{F}_{17}$  [3], выявлено образование новой фазы. Исследования, проведенные на четырёхкружном дифрактометре (Rigaku XtaLAB Synergy-S (излучение  $\text{MoK}_\alpha$ )), и обработка данных в программе Jana2020 позволили установить кристаллическую структуру новой фазы. Химическая формула —  $\text{Na}_2\text{BaY}_4\text{F}_{16}$ , моноклинная сингония, пр. группа  $C2/m$ ,  $Z = 2$ , параметры решётки:  $a = 12,1948(3) \text{ \AA}$ ,  $b = 8,2486(2) \text{ \AA}$ ,  $c = 7,0894(2) \text{ \AA}$ ,  $\beta = 119,893(3)^\circ$ ,  $V = 618,25(3) (\text{ \AA}^3)$ ,  $R_{\text{obs}} = 0,013$ . Координационные числа: иттрия — 8, бария — 12.

По данным дифференциально-термического анализа (Netzsch STA 449 F3 Jupiter) соединение плавится с разложением при 808 °С.

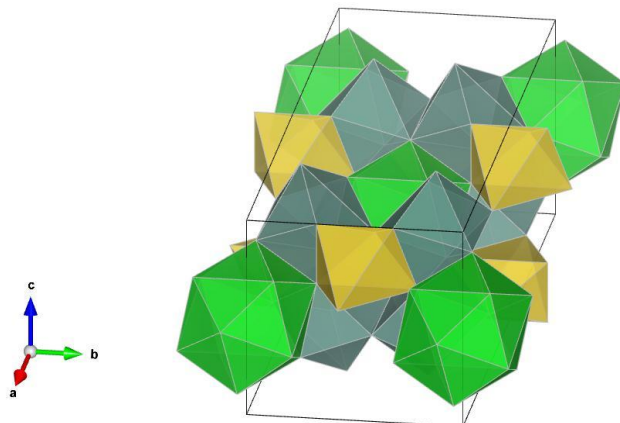


Рис. 1. Кристаллическая структура  $\text{Na}_2\text{BaY}_4\text{F}_{16}$

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.х.н. Федорову П.П. за постановку научной задачи и обсуждение результатов; из Федерального исследовательского центра "Кольский научный центр РАН" (г. Апатиты) Волкову С.Н. за помощь в измерениях и обсуждение результатов, а также к.ф.-м.н. Воронову В.В. за помощь в измерениях.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-13-00167, <https://rscf.ru/project/22-13-00167/>.

1. Sobolev B.P. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. 2000. 521.
2. Pavlova L.N., Fedorov P.P., O'khovaya L.A., et al. Crystallogr. Rep. 1993, **38**(2), 221–224.
3. Федоров П.П., Волчек А.А., Воронов В.В. и др. Конденсированные среды и межфазные границы, 2024, **26**(2), 314–320.

## Получение и характеристика массивов Si микровискеров, декорированных SiC на верхушке

**Волчков И.С.**

*Отделение Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова  
Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»*

*E-mail: [volch2862@gmail.com](mailto:volch2862@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-93-95

Карбид кремния (SiC) обладает рядом уникальных механических и электрических свойств, определяющих интерес к нему как к функциональному материалу для электронных устройств высоковольтных и высокотемпературных приложений, датчиков в современных технологических устройствах.

Известно, что существует большое количество политипов SiC: кубический 3C-SiC [1] и гексагональные 4H-SiC [2] и 6H-SiC [3]. Кубический аллотроп SiC (3C-SiC) имеет важные преимущества по сравнению с гексагональным SiC. Прежде всего, его можно применять в МОП-транзисторах, работающих в диапазоне низких напряжений 600–1200 В, с более высокой подвижностью электронов и низким сопротивлением [4]. Более того, его кристаллографическая совместимость с кремнием (Si) позволяет выращивать гетероэпитаксиальные пленки и структуры 3C-SiC на подложках Si. Однако процесс выращивания 3C-SiC имеет серьезные недостатки. Прежде всего, несоответствие решеток 3C-SiC и Si (~20 %) создает напряжение на гетерогранице, которое высвобождается за счет образования кристаллографических дефектов.

В связи с этим, целью настоящей работы была модификация методики получения микро- и наноструктур на основе Si, декорированного тонким слоем 3C-SiC, с целью упрощения и удешевления метода получения эпитаксиальных структур 3C-SiC на Si.

В работе были использованы 2 типа подложек Si с выращенными массивами вискеро́в Si по методу пар-жидкость-кристалл [5]. Использовались подложки с классическим регулярным массивом Si вискеро́в (рис. 1a), а также подложка, с массивом вискеро́в Si, в которой часть поступающего пара Si уходила на пленочный рост по механизму пар-кристалл, в результате чего

образовалась регулярная «треугольная» структура подложки с массивами Si вискеров (рис. 1б).

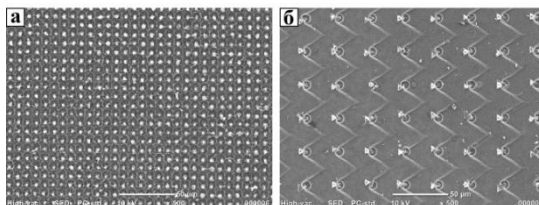


Рис. 1. РЭМ-изображения массивов Si вискеров, с декорированием SiC на верхушке: образец с классической регулярной структурой (а), образец с «треугольной» структурой (б).

Далее на образцы наносился тонкий углеродный слой, после чего образцы отжигались при температуре 1200 °С в течение 2 часов, в атмосфере низкого вакуума. Полученные образцы исследовались методом растровой электронной микроскопии на JCM-6000 Plus (Jeol) с энергодисперсионной (ЭДС) приставкой в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 15 кВ. ЭДС-анализ также проводился на JCM-6000 Plus. Фазовый состав образцов исследовался методом рентгенофазового анализа (РФА) на порошковом рентгеновском дифрактометре X'Pert Pro MPD (Panalytical) в диапазоне углов  $2\theta$ : 30–80° в геометрии по Брэггу-Брентано с использованием  $K\alpha$ -линии меди ( $\lambda = 0,154$  нм). Спектры комбинационного рассеяния были записаны с использованием системы NTEGRA SPECTRA (Нова СПб) с использованием длины волны лазера 532 нм.

Результаты РФА показали присутствие в образцах как фаз SiC, так и непрореагировавшего свободного фуллереноподобного углерода (рис. 2). В случае образца с «треугольной» регулярной структурой также обнаруживаются пики SiO<sub>2</sub>.

На спектрах комбинационного рассеяния образцов присутствуют пики при 522 см<sup>-1</sup>, соответствующие Si, а также пики при 792 см<sup>-1</sup> и 964 см<sup>-1</sup>, соответствующие пикам рамановского колебания SiC. Также присутствует ряд характерных пиков около 1364 см<sup>-1</sup> и 1600 см<sup>-1</sup>, соответствующих моде колебаний A<sub>1g</sub> микрокристаллов графита и валентному колебанию E<sub>2g</sub> в плоскости решетки графита, соответственно.

Таким образом, были получены образцы массивов вискеро́в Si, декорированных SiC с классической регулярной и «треугольной» структурами. ЭДС анализ показал скопление углерода именно на верхушках вискеро́в Si. Результаты РФА и спектроскопии комбинационного рассеяния позволяют говорить об образовании именно декорирующего слоя SiC, а также значительном присутствии фуллереноподобного свободного углерода. В результате мы можем говорить о возможности получения массивов Si вискеро́в, декорированных слоем SiC, однако необходима дальнейшая работа по получению эпитаксиальных покрытий на поверхности вискеро́в, что позволит использовать данные структуры в устройствах полевой эмиссии.

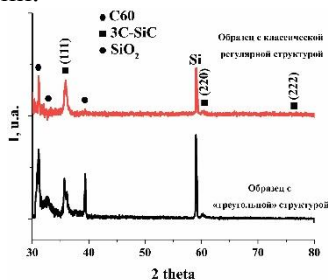


Рис. 2. Рентгенограммы исследуемых образцов массивов вискеро́в Si, декорированных SiC.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Автор выражает благодарность, д.ф.-м.н. Каневскому В.М. и к.ф.-м.н. Бутащину А.В. за постановку научной задачи, а также Гиваргизову М.Е. за предоставленные подложки Si с массивами вискеро́в и Дерябину А.Н. за проведение температурной обработки образцов, после нанесения слоя углерода.

1. Agati M., Boninelli S., Calabretta C., et al., Mater. Des., 2021, **208**, 109833.
2. Wang K., Wang H., Chen C., et al., ACS Appl. Mater. Interfaces. 2023, **15**(19), 23457–23469.
3. Kishida K., Shinkai Y., Inui H. Acta Mater. 2020, **187**, 19–28.
4. Nagasawa H., Abe M., Yagi K., et al., Phys. Status Solidi (b), 2008, **245**(7), 1272–1280.
5. Гиваргизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука, 1977, 303 с.



## Характеризация нового кристалла $\text{Sr}_{0,86}\text{Ba}_{0,14}\text{MoO}_4$ для преобразования излучения с помощью эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР)

Терещенко Д.П.<sup>1</sup>, Кочуков Ю.А.<sup>1,2</sup>, Губина К.А.<sup>1,2</sup>

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

2- Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Москва

E-mail: [axiniy@list.ru](mailto:axiniy@list.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-96-98

Спектр применения лазерных технологий в химии, биологии и медицине с каждым днём становится все более широким: изучение основных и возбужденных состояний атомов и молекул, неинвазивные медицинские исследования живых тканей и т.д. – но вместе с этим повышаются и требования к используемым источникам излучения. Для большей контрастности получаемых изображений и повышения разрешаемой способности приборов необходимы компактные системы, обеспечивающие высокую спектральную плотность в ближнем ИК-диапазоне и сверхкороткую длительность быстро повторяющихся импульсов [1, 2].

Ранее уже сообщалось об успешной многоволновой ВКР-генерации с малым межволновым интервалом в монокристаллах шеелитовых твёрдых растворов  $\text{Pb}(\text{MoO}_4)_{1-x}(\text{WO}_4)_x$  при  $x=0,5$ ; 0,8 и  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0,8}(\text{WO}_4)_{0,2}$  при синхронной накачке неодимовым твердотельным лазером с длительностью импульсов в десятки пикосекунд. Главным условием являлось вовлечение низкочастотной и низкоинтенсивной колебательной моды  $\nu_2$  в каскадный процесс нестационарного ВКР, что достигалось за счёт увеличения её интегрального сечения до значения, характерного для высокоинтенсивной и высокочастотной моды  $\nu_1$ . В кристалле анионного твёрдого раствора со структурой шеелита это происходило благодаря значительному уширению моды  $\nu_2$  [3, 4]. Теперь мы нашли подобный эффект выравнивания интегральных сечений этих мод в катионном твёрдом растворе  $\text{Sr}_{0,86}\text{Ba}_{0,14}\text{MoO}_4$  вследствие существенного уширения и моды  $\nu_1$ . Однако, возможности применения в многоволновой ВКР-генерации катионных шеелитовых твёрдых растворов и эффективность накачки кристаллов более короткими импульсами остаются мало изученными.

Анализ поляризованных спектров спонтанного комбинационного рассеяния света монокристалла твёрдого раствора  $\text{Sr}_{0,86}\text{Ba}_{0,14}\text{MoO}_4$  показала, что его колебательные линии сохранили одномодовый характер, отвечающий номинально чистому шеелиту. Значения частот КР-сдвига для мод  $\nu_1$  и  $\nu_2$  равны  $887,5 \text{ см}^{-1}$  и  $327,0 \text{ см}^{-1}$  и близки по значениям к  $\text{SrMoO}_4$  вследствие большей концентрации Sr в рассматриваемом составе. Обе моды испытывают уширение: при  $E \parallel c$   $\Delta\nu_1 = 6,5 \text{ см}^{-1}$  и  $\Delta\nu_2 = 12,3 \text{ см}^{-1}$  (у  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0,8}(\text{WO}_4)_{0,2}$   $4,3 \text{ см}^{-1}$  и  $11,7 \text{ см}^{-1}$ ). В той же геометрии рассеяния интенсивности низко- и высокочастотной линий отличаются всего в 2,1 раза (у  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0,8}(\text{WO}_4)_{0,2}$  в 3,2 раза), поэтому дальнейшие оценки и эксперимент по ВКР проводились при этом условии. Известно, что коэффициент ВКР-усиления  $g$  пропорционален интенсивности колебательной линии, тогда можно считать, что произведение  $g\Delta\nu$  пропорционально ее интегральному сечению [4]. При  $\lambda_p = 1,06 \text{ мкм}$  для  $\text{Sr}_{0,86}\text{Ba}_{0,14}\text{MoO}_4$   $g_1\Delta\nu_1$  и  $g_2\Delta\nu_2$  оказываются почти равными —  $30,55 \text{ ГВт}^{-1}$  и  $27,55 \text{ ГВт}^{-1}$  соответственно, а порог нелинейного эффекта захвата фаз волн в комбинационно-параметрической связи на  $\nu_2$  оказался равным  $I_{p2} > \Delta k_2 / g_2 = 4,4/2,24 = 1,96 \text{ ГВт/см}^2$ , что ниже, чем для номинально чистого  $\text{SrMoO}_4$  ( $3,7 \text{ ГВт/см}^2$ ) и  $\text{Sr}(\text{MoO}_4)_{0,8}(\text{WO}_4)_{0,2}$  ( $2,5 \text{ ГВт/см}^2$ ).

Для эксперимента по ВКР из монокристалла  $\text{Sr}_{0,86}\text{Ba}_{0,14}\text{MoO}_4$  был изготовлен активный элемент длиной 4,2 см с антиотражающими покрытиями на торцах, параллельных оптической оси кристалла. В качестве лазера накачки использовался Yb-волоконный лазер с  $\lambda_p = 1030 \text{ нм}$  и длительностью чирпированных импульсов (0,24–6,00) пс, при которой ВКР становится существенно нестационарным, и роль интегрального сечения колебательной моды в ВКР-генерации повышается. При энергии импульсов 20 мкДж и частоте их следования 20 Гц была зарегистрирована многоволновая ВКР-генерация, что продемонстрировано на рис. 1.

Спектроскопическое исследование отдельных ВКР-компонент позволило зафиксировать девять составляющих: 1261, 1224, 1177, 1133, 1104, 1066 нм ( $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{122}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_{22}$ ,  $\lambda_2$  на рис. 1) и 996, 965, 944 нм ( $\lambda_{a2}$ ,  $\lambda_{a22}$ ,  $\lambda_{a1}$  на рис. 1). Накачка чирпированными (частотно-модулированными) импульсами применялась с целью компенсации нелинейной фазовой модуляции в среде для повышения эффективности нестационарного ВКР [5]. Так, например, при

«отрицательном» *чирпе* длительностью 2,00 пс энергетическая эффективность преобразования излучения накачки в суммарное ВКР-излучение составила 29 %.



Рис. 1. ВКР-компоненты, генерируемые  $\text{Sr}_{0,86}\text{Ba}_{0,14}\text{MoO}_4$ .

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Сметанину С.Н. и к.ф.-м.н. Шукшину В.Е. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 24-12-00448.

1. M. Maiuri, M. Garavelli, G. Cerullo., J. Am. Chem. Soc. 2019, **142** (1), 3-15.
2. San-Liang Lee, Tien-Chang Lu, Yung-Jr Hung et al., Appl. Phys. Lett. 2020, **116** (18).
3. M. Frank, S.N. Smetanin, M. Jelinek et al., Crystals. 2022, **12**(2), 148.
4. Д.П. Терещенко, С.Н. Сметанин, А.Г. Папашвили и др., ЖТФ. 2023, **93**, 488-494.
5. А.В. Конященко, П.В. Кострюков, Л.Л. Лосев и др., Квантовая электроника. 2017, 47(7), 593–596.

## Изучение свойств твёрдых растворов состава $\text{Eu}^{3+}:\text{Ca}_x\text{Na}_{(1-x)/2}\text{Gd}_{(1-x)/2}\text{MoO}_4$ ( $x = 0-1$ )

Диденко Я.С.<sup>1,2</sup>, Титов А.И.<sup>1</sup>, Павлов С.К.<sup>1,2</sup>, Зимина Ю.И.<sup>1,2</sup>

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

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

E-mail: [ia.didenko@yandex.ru](mailto:ia.didenko@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-99-101

Разупорядоченные монокристаллы шеелитоподобных молибдатов и вольфраматов являются перспективными материалами для активных сред лазеров, рамановских сред, а также люминофоров белого света и сцинтилляторов. Кристаллы твёрдых растворов могут сочетать в себе полезные свойства крайних членов концентрационных рядов (кристаллов индивидуальных химических соединений) и даже обладать новыми свойствами, неаддитивными по отношению к свойствам крайних членов. Шеелитоподобный кристалл молибдата кальция ( $\text{CaMoO}_4$ ) обладает хорошей механической прочностью, но характеризуется низкими коэффициентами вхождения редкоземельных примесей в кристалл, тогда как кристалл  $\text{Na}_{0,5}\text{Gd}_{0,5}\text{MoO}_4$ , напротив, имеет хороший коэффициент вхождения примесей, но малую прочность. Мы считаем, что оптимизация состава твёрдого раствора  $\text{Ca}_x\text{Na}_{(1-x)/2}\text{Gd}_{(1-x)/2}\text{MoO}_4$  ( $x = 0-1$ ) открывает перспективу создания лазерного кристалла с уникальным сочетанием свойств.

Серия из семи монокристаллов твёрдых растворов состава 0,1 ат.%  $\text{Eu}:\text{Ca}_x\text{Na}_{(1-x)/2}\text{Gd}_{(1-x)/2}\text{MoO}_4$ , где  $x = 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1$ , была выращена на воздухе методом Чохральского в рамках данной работы. Были измерены их фактические составы, плотности, механические характеристики, теплопроводности и спектры поглощения, по результатам рентгенофазового анализа рассчитаны параметры элементарной ячейки. Также для этих кристаллов были измерены показатели преломления, дисперсии и температурные коэффициенты. По всем указанным характеристикам были получены функции смешения твёрдых растворов.

Выращенные монокристаллы имели чёрную окраску, обусловленную наличием центров окраски на основе кислородных вакансий и/или частично восстановленных ионов молибдена. После

отжига на воздухе при температуре 800 °С кристаллы посветлели и приобрели желто-зелёную окраску, за исключением кристалла  $\text{CaMoO}_4$ , который стал серовато-голубоватым.

Между фактическим составом кристалла и составом расплава в исследованном ряду наблюдалось небольшое отклонение от закона аддитивности: ионы  $\text{Ca}^{2+}$  внедрялись в структуру кристалла более охотно, а  $\text{Na}^+$  и  $\text{Gd}^{3+}$  в большей степени оттеснялись в расплав.

Гидростатическая плотность кристаллов почти линейно возрастала с увеличением доли ( $\text{Na}^+ + \text{Gd}^{3+}$ ) и с уменьшением доли  $\text{Ca}^{2+}$  в кристалле. В этом отношении данный твёрдый раствор можно считать почти идеальным. Измеренные плотности совпали с ранее проведенным расчётом [1]. Гидростатические плотности одних и тех же кристаллов до и после отжига совпали с точностью до третьей значащей цифры, что указывает на то, что плотности были практически нечувствительны к наличию центров окраски на основе кислородных вакансий.

Рассчитанные параметры элементарной ячейки  $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2$  и  $\text{CaMoO}_4$  совпали с большинством экспериментальных литературных данных [2, 3] и с результатами расчётной работы [1]. Параметр  $c$  почти не зависел от концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ , а параметр  $a$  уменьшался с увеличением доли  $\text{Ca}^{2+}$ .

Микротвердость кристаллов монотонно возрастала с увеличением доли  $\text{Ca}^{2+}$  от 2,64 до 3,77 в направлении индентирования вдоль «с» и от 3,37 до 5 ГПа в направлении индентирования перпендикулярно ей. Трещиностойкость всех кристаллов составила  $\sim 0,35 \text{ МПа} \times \text{м}^{1/2}$ .

Коэффициент распределения  $\text{Eu}^{3+}$  между кристаллом и расплавом резко падал от 1 до 0,02 с увеличением доли  $\text{Ca}^{2+}$ . Функции смещения для этого параметра показали достаточно серьёзные отклонения исследуемого ряда твёрдых растворов от идеального.

Были измерены спектры оптического поглощения кристаллов. Форма характерных полос поглощения  $\text{Eu}^{3+}$  при 300 К почти не менялась в изученном ряду кристаллов. Зависимость пикового сечения поглощения для перехода  ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_2$   $\text{Eu}^{3+}$  на длине волны  $\sim 467 \text{ нм}$  от доли  $\text{Ca}^{2+}$  в кристалле проходила через максимум, наблюдаемый при доле  $\text{Ca}^{2+}$  от 0,5 до 0,7,  $\sigma_{\text{погл}}^{\text{max}} = 7,67 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ .

Таким образом, непрерывный ряд шеелитоподобных твёрдых растворов  $\text{CaMoO}_4\text{--Na}_{0,5}\text{Gd}_{0,5}\text{MoO}_4$  продемонстрировал некоторые отклонения от идеальности (аддитивности).

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.т.н. Субботину К.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Дудникова В.Б., Антонов Д.И., Жариков Е.В., Еремин Н.Н., Физика Твёрдого Тела. 2022, **64**(11), 1741–1750.
2. Кузьмичева Г.М., Жариков Е.В., Субботин К.А. и др., Неорганические материалы. 2005, **41**(9), 1133–1145.
3. Александров В.Б., Горбатый Л.В., Илюхин В.В. Кристаллография. 1968, **13**(4), 414–415.

## **Альгинатные гидрогели на основе ионов иттрия и висмута как носители радионуклидов для радиоэмболизации**

**Евдокимов А.А., Черных И.Н.**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

*E-mail: [EvdokimovAA@my.msu.ru](mailto:EvdokimovAA@my.msu.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-102-104

В настоящее время применение биополимеров в медицине получило широкое распространение, особенно интересным является направление, связанное с носителями лекарственных средств. Одним из наиболее перспективных биополимеров, применяемых в этих целях, является альгинат. Гидрогели на его основе позволяют включать различные ионы металлов и инкапсулировать биологически активные молекулы в полимерной матрице, за счет множества реакционноспособных групп [1]. Материалы на основе альгинатных гидрогелей отличаются нетоксичностью, биосовместимостью, биоразлагаемостью, дешевизной и простотой синтеза.

Применение альгинатных гидрогелей в радиоэмболизации вызывает интерес вследствие возможности жесткой фиксации радионуклида в полимерной матрице. Исключения вероятности высвобождения радионуклида из материала радиоэмболизатора возможно достичь путём минерализации полученных гидрогелей фосфатами кальция, обладающими высокой сорбционной емкостью [2]. Данная работа посвящена созданию материалов-носителей радионуклидов на основе альгинатных гидрогелей для радиоэмболизации. В качестве основного радионуклида выбран изотоп иттрия-90 в силу его привлекательных ядерно-физических свойств.

В ходе данной работы были получены альгинатные гидрогели, посредством сшивки ионами  $Y^{3+}$  и  $Bi^{3+}$ . Использование материалов на основе висмута представляет интерес вследствие способности данного элемента поглощать рентгеновское излучение ( $5,739 \text{ см}^2/\text{г}$  при  $100 \text{ кэВ}$ ). Данный факт обуславливает теоретическую возможность применения висмута как контрастного вещества в компьютерной томографии [3]. Таким образом, появляется возможность визуализации эффекта эмболии и контроля распространения гидрогелей в организме.

Альгинатные материалы получали прикапыванием раствора альгината натрия к растворам иттрия и висмута при перемешивании. В результате получили альгинатные сферы миллиметрового размера, которые затем отмывали дистиллированной водой. При погружении сфер, сшитых висмутом в воду, наблюдалось выпадение белого мелкодисперсного осадка в раствор и на поверхности самих гидрогелей, что обусловлено образованием кристаллической фазы оксихлорида висмута  $\text{BiOCl}$ , структура которого была подтверждена методом рентгенофазового анализа.

Полученные материалы характеризовали методами оптической и электронной микроскопии, на полученных микрофотографиях наблюдается развитая поверхность высушенных сфер, сшитых ионами висмута (рис. 1). Подобное структурное многообразие форм возможно обусловлено механизмом кристаллизации оксихлорида висмута. С помощью энергодисперсионной спектроскопии установлено равномерное распределение элементов на поверхности гидрогелей.

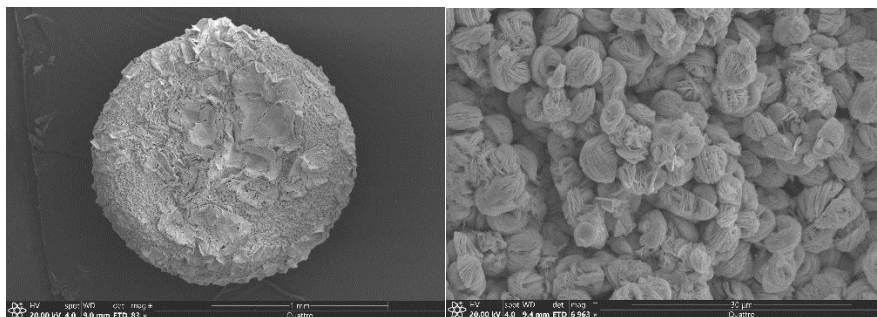


Рис. 1. Фотографии сферы, сшитой ионами висмута(слева), и её поверхности (справа), полученные на электронном микроскопе.

Структурные особенности альгинатных сфер на основе иттрия и висмута исследованы с помощью методов ИК- и КР-спектроскопии. Методами жидкостно-сцинтилляционной спеткроскопии по черенковскому излучению исследовалась кинетика изотопного обмена между Y-89 и Y-90 в полученных альгинатных сферах, сшитых ионами стабильного иттрия. Показана высокая степень обмена и скорость процесса, что свидетельствует о перспективности данного способа введения радионуклида в альгинатные гидрогели.



Таким образом, проведенные исследования и полученные результаты свидетельствуют о привлекательности применения новых материалов — альгинатных гидрогелей, сшитых трёхзарядными ионами иттрия и висмута, как носителей радионуклидов в радиоэмболизации.

Авторы выражают благодарность научным руководителям, к.х.н. Николаеву А.Л. за постановку научной задачи и к.х.н. Гопину А.В за помощь в измерениях и обсуждении результатов.

1. Papageorgiou S.K., Katsaros F.K., Kouvelos E.P., et al., J. Hazard. Mater. 2006, **137**(3), 1765–1772.
2. Chernykh I.N., Dolgova V.K., Gopin A.V., et al., Ceram. Int. 2024, **50**(6), 9149–9158.
3. Xuan Y., Song X.-L., Yang X.-Q. et al., Chem. Eng. J. 2019, **375**, 122000.

## Транспортные характеристики монокристаллического высокоэнтропийного кубического твёрдого раствора на основе диоксида циркония

Захаров Д.М.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

E-mail: [deniszakharovm@mail.ru](mailto:deniszakharovm@mail.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-105-107

Высокоэнтропийные оксидные керамические материалы содержат не менее 5 стабилизирующих оксидов в равных концентрациях. Благодаря многокомпонентному составу они обладают высокой энтропией и представляют особый интерес с точки зрения уникальных свойств. Особенность таких материалов в том, что многокомпонентные системы могут проявлять неожиданные свойства за счёт термодинамических характеристик, которые проявляются при большом числе компонентов в составе. Меняя концентрацию отдельных компонентов можно варьировать довольно в широком диапазоне различные функциональные характеристики материала [1].

В частности, в керамике из диоксида циркония, стабилизированного большим количеством оксидов потенциально можно варьировать такие параметры, как механическая прочность, фазовая стабильность и ионная проводимость. Подобные материалы находят применения в твердотельных ионных проводниках, термобарьерных покрытиях, газовых датчиках, кислородных накопительных конденсаторах, биомаркерах, мемристорах и катализаторах [2].

Данная работа посвящена синтезу и исследованию структурных и транспортных характеристик высокоэнтропийных монокристаллов состава

$(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,02}(\text{Er}_2\text{O}_3)_{0,02}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0,02}(\text{Gd}_2\text{O}_3)_{0,02}(\text{Ho}_2\text{O}_3)_{0,02}$ . В работе также проведено сравнение структуры и свойств полученного монокристалла с монокристаллами двухкомпонентных твёрдых растворов на основе диоксида циркония  $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{R}_2\text{O}_3)_{0,1}$ , где  $\text{R} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Yb}$ . Все кристаллы выращивали методом направленной кристаллизацией из расплава в холодном тигле. Фазовый анализ

проводился методом рентгеновской дифрактометрии. Ионная проводимость измерялась методом импедансной спектроскопии.

Фазовый анализ показал, что полученные высокоэнтропийные кристаллы с суммарной концентрацией стабилизирующих оксидов, равной 10 мол.%, обладают кубической модификацией  $\text{ZrO}_2$ , также как и двухкомпонентные твердые растворы на основе диоксида циркония  $(\text{ZrO}_2)_{0,9}(\text{R}_2\text{O}_3)_{0,1}$ , где  $\text{R} = \text{Y}, \text{Gd}, \text{Yb}$ . Зависимость параметра решетки кристаллов бинарных твёрдых растворов от размера ионного радиуса катиона стабилизирующего оксида имеет линейный характер (рис. 1 справа). При этом усредненное значение ионного радиуса высокоэнтропийного монокристалла, полученного из приведенной зависимости с учетом экспериментального значения параметра решетки хорошо коррелирует с величиной ионного радиуса, полученного расчетным путем.

Измерение ионной проводимости и дальнейшее сравнение с кристаллами двухкомпонентных твёрдых растворов показало, что проводимость высокоэнтропийного кристалла во всём температурном диапазоне (от 350 до 900 °C) была выше, чем у кристаллов с 10 мол.% оксида иттрия или 10 мол.% оксида гадолиния, но меньше чем у аналогичного состава с оксидом иттербия. Сравнение температурных зависимостей проводимостей показано на рис. 1 (слева).

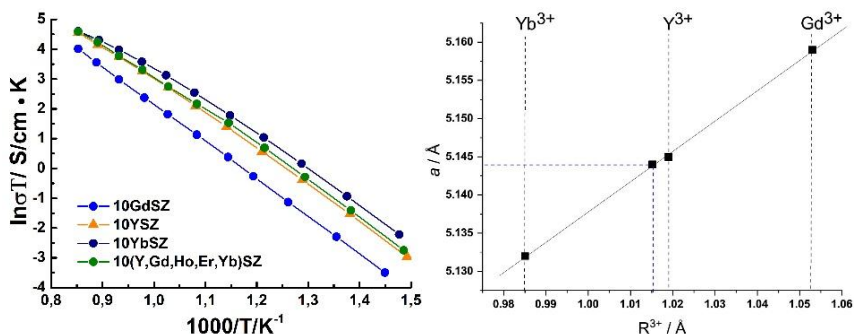


Рис. 1. Зависимость проводимости от температуры разных составов в аррениусовских координатах (слева) и зависимость параметра решётки от ионного радиуса стабилизирующего катиона (справа)

Автор выражает благодарность научному коллективу лаборатории «Фианит» за постановку научной задачи, помощь в проведении измерений и обсуждении результатов.

1. Anandkumar M., Trofimov E., Journal of Alloys and Compounds. 2023, **960**, 170690.
2. Wright A.J., Wang Q., Huang Ch., Nieto A., Chen R., Luo J., Journal of the European Ceramic Society. 2020, **40**, 2120–2129.

## Спектрально-люминесцентные, механические и лазерные генерационные характеристики нового лазерного кристалла $\text{Tm}^{3+}:\text{ZnWO}_4$

**Зими́на Ю.И.<sup>1,2</sup>, Титов А.И.<sup>1,2</sup>, Кулешова К.В.<sup>1,2</sup>, Павлов С.К.<sup>1,2</sup>,  
Диденко Я.С.<sup>1,2</sup>**

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

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

E-mail: [yulia\\_zimina@inbox.ru](mailto:yulia_zimina@inbox.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-108-110

В последнее время моноклинные кристаллы вольфраматов (пр. гр.  $P2_1/c$ ) двухвалентных ионов  $\text{MWO}_4$  (где  $M = \text{Mg}, \text{Zn}$ ), легированные редкоземельными ионами ( $\text{PЗИ}$ ,  $R^{3+}$ ), активно исследуются в качестве перспективного класса материалов для создания на их основе активных лазерных сред ближнего ИК диапазона [1]. Данный класс кристаллов обладает существенным штарковским расщеплением мультиплетов  $R^{3+}$ -ионов, высокими значениями и сильной анизотропией пиковых сечений поглощения и стимулированной люминесценции, а также неоднородную уширенность полос излучения и поглощения  $R^{3+}$ -ионов в данных матрицах.

В частности, на кристалле  $\text{Tm}^{3+}:\text{MgWO}_4$  была получена перестраиваемая генерация в диапазоне, выходящем за пределы 2 мкм [2]. Однако выращивание кристалла  $\text{MgWO}_4$  проблематично. Структурным аналогом кристалла  $\text{MgWO}_4$  является  $\text{ZnWO}_4$ . Этот кристалл плавится конгруэнтно и может быть легко выращен методом Чохральского.

Целью данной работы являлось выращивание концентрационной серии кристаллов  $\text{ZnWO}_4$ , легированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$  и исследование их оптических, механических прочностных, спектрально-люминесцентных, а также лазерных генерационных характеристик.

Кристаллы  $\text{Tm}^{3+}, \text{Li}^+:\text{ZnWO}_4$  были выращены методом Чохральского на воздухе из Pt тигля. В качестве затравки использовался номинально-чистый кристалл  $\text{ZnWO}_4$ , вырезанный вдоль кристаллографического направления  $[001]$ . Скорости вытягивания и вращения составляли 0,5–2 мм/ч и 6 об/мин,

соответственно. Выращенные кристаллы дополнительно отжигались на воздухе при 800 °С в течение 2 недель.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой были установлены фактические концентрации легирующих примесей.

Методом призмы были измерены дисперсии и температурные коэффициенты показателей преломления для кристалла 1,59 ат.% Tm, 1,65 ат.% Li:ZnWO<sub>4</sub>. Показатели преломления  $n_p$  и  $n_g$  кристалла изменяются в пределах 2,09÷2,16 и 2,23÷2,35, соответственно ( $\lambda=0,4\div1,0$  мкм, 300 К). Температурные коэффициенты показателей преломления уменьшаются от  $1,2\times10^{-5}$  до  $2,0\times10^{-6}$  в том же диапазоне длин волн.

Методом индентирования были измерены микротвердости и трещиностойкости кристаллов для трех кристаллографических направлений. Микротвердость кристалла Tm<sup>3+</sup>,Li<sup>+</sup>:ZnWO<sub>4</sub> составляет от 3,9 до 4,8 ГПа, трещиностойкость — от 0,43 до 0,74 МПа·м<sup>1/2</sup> для различных направлений.

Ионы Tm<sup>3+</sup> в ZnWO<sub>4</sub> демонстрируют сильную анизотропию спектроскопических свойств. Полосы поглощения очень широкие (рис. 1а), пиковое сечение поглощения перехода <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub> составляет  $1,09\times10^{-20}$  см<sup>2</sup> на длине волны 803,6 нм для поляризации  $E||N_g$ . Спектры излучения также очень широкие, простираются за пределы 2 мкм (рис. 1б). Пиковое сечение стимулированной люминесценции составляет  $0,77\times10^{-20}$  см<sup>2</sup> на длине волны 2015 нм для поляризации  $E||N_p$ .

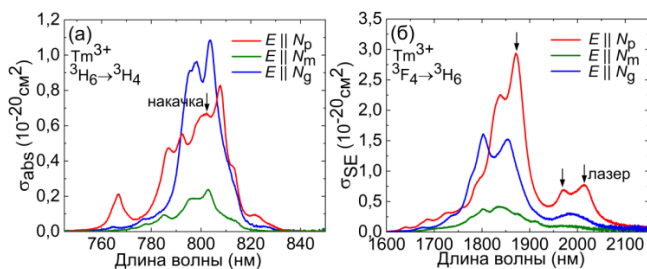


Рис. 1. Спектры поглощения (а) и вынужденного излучения (б) ионов Tm<sup>3+</sup> в кристалле Tm,Li:ZnWO<sub>4</sub>

Время жизни уровня <sup>3</sup>F<sub>4</sub> ионов Tm<sup>3+</sup> в ZnWO<sub>4</sub> составляет 1,57 мс при температуре 300 К. При помощи низкотемпературной

(12 K) спектроскопии определено штарковское расщепление в кристалле  $\text{ZnWO}_4$  мультиплетов  $^3\text{H}_6$  и  $^3\text{F}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . Показано, что расщепление указанных мультиплетов в данном кристалле довольно велико, и равно  $\Delta E(^3\text{H}_6) = 644 \text{ см}^{-1}$ .

Была получена непрерывная лазерная генерация на кристалле 1,59 ат.% Tm, 1,65 ат.% Li: $\text{ZnWO}_4$  с использованием полусферического резонатора. Источником накачки служил титан-сапфировый лазер с рабочей длиной волны 804 нм. Энергетические характеристики и спектр лазерного излучения приведены на рис. 2.

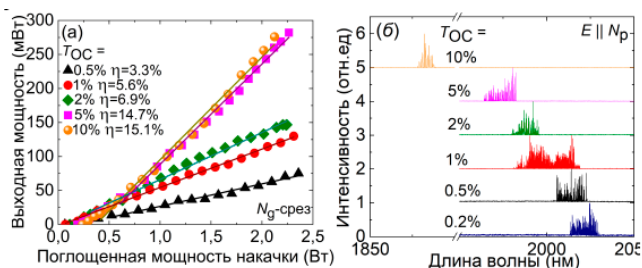


Рис. 2. Лазерные характеристики кристалла Tm,Li: $\text{ZnWO}_4$ .  
Энергетические характеристики(а) и спектр лазерного излучения (б)

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.т.н. Субботину К.А. и Лису Д.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Zhang L., Chen W. et al., Opt. Mater. Express. 2016, **6**, 1627–1645.
2. Loiko P., Zhang L., et. al., J. Alloy Compd. 2018, **763**, 581–591.

## **Анализ степени кристалличности полиэтилентерефталата методом спектроскопии комбинационного рассеяния света**

**Козлова Л.Ю.<sup>1</sup>, Васимов Д.Д.<sup>1</sup>, Менделеев Д.И.<sup>2</sup>, Новиков В.С.<sup>1</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева*

*Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [vs.novikov@kapella.gpi.ru](mailto:vs.novikov@kapella.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-111-113

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) и полиэтилентерефталат-гликоль (ПЭТГ) широко используются во многих областях деятельности человека, в том числе для производства пищевой, медицинской и косметической тары, в 3D печати и при изготовлении текстильных волокон. Важным достоинством ПЭТ является реализация на практике эффективной и экономически оправданной вторичной переработки этого полимера.

Степень кристалличности (СК) ПЭТ значительно влияет на его свойства — механические, оптические, барьерные. СК ПЭТ в изотропном состоянии не превышает 45%, в ориентированном состоянии — 65%. СК и, соответственно, свойства материалов на основе ПЭТ можно управляемо изменять путем сополимеризации, деформации и термической обработки, что значительно расширяет спектр применения данного материала. В ПЭТГ кристаллизация подавляется введением в цепи ПЭТ звеньев 1,4-циклогександиметанола.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света позволяет проводить экспресс-анализ молекулярных веществ неразрушающим способом. Хотя спектроскопия КР и применяется для исследования свойств ПЭТ и ПЭТГ, до сих пор более затяжные и разрушающие методы остаются преобладающими при определении их СК. С произошедшим за последние годы появлением портативных и коммерчески доступных КР спектрометров развитие методик определения СК ПЭТ и ПЭТГ по спектрам КР может повлечь за собой расширение использования этого более эффективного подхода.

В данной работе исследуется зависимость спектров КР ПЭТ и ПЭТГ от СК. Спектры КР исследуемых образцов зарегистрированы при возбуждении излучением с длиной волны 785 нм и спектральном разрешении  $1,5 \text{ см}^{-1}$ . В качестве дополнительного метода



используется дифференциально-термический анализ (ДТА). При расчете СК по данным ДТА значение теплоты плавления для образца со СК=100% полагалось равным 140 Дж/г.

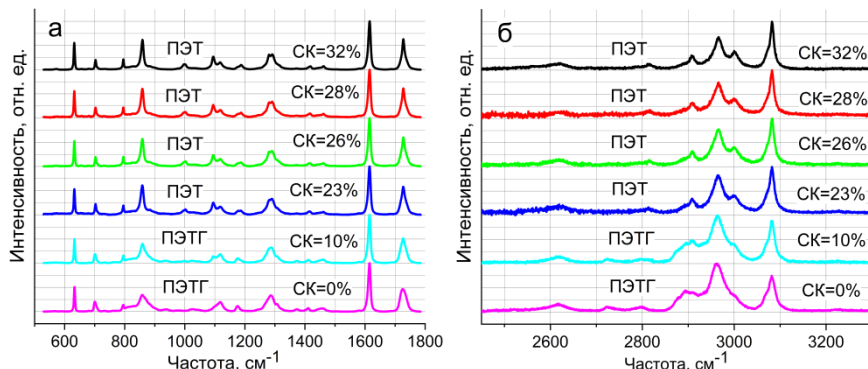


Рис. 1. Спектры КР ПЭТ и ПЭТГ с различной СК в диапазонах 530–1785 (а) и 2450–3300 (б) см<sup>-1</sup>.

Рядом со спектром указано значение СК соответствующего образца по данным ДТА.

Рис. 1 демонстрирует спектры КР коммерческих образцов ПЭТ и ПЭТГ в исходном виде и подвергнутых механической и термической обработке, что позволило получить набор образцов со степенью кристалличности от 0 до 32%. Установлено, что спектры КР меняются монотонно с изменением СК. Наиболее сильно от СК зависят интенсивности и ширины полос с частотами около 858, 1096, 1729 и 2962 см<sup>-1</sup> (рис. 1).

Величины относительных интенсивностей выделенных полос КР линейно соответствуют значениям СК ПЭТ и ПЭТГ (рис. 2а), полученных по данным ДТА (рис. 2б). Отношение  $I_{2962}/I_{3082}$  интенсивностей линий с частотами 2962 и 3082 см<sup>-1</sup> наиболее сильно меняется при вариации СК. Эти две линии близко расположены и имеют высокую интенсивность. В результате, отношение  $I_{2962}/I_{3082}$  наиболее удобно использовать для определения СК ПЭТ и ПЭТГ по спектрам КР.

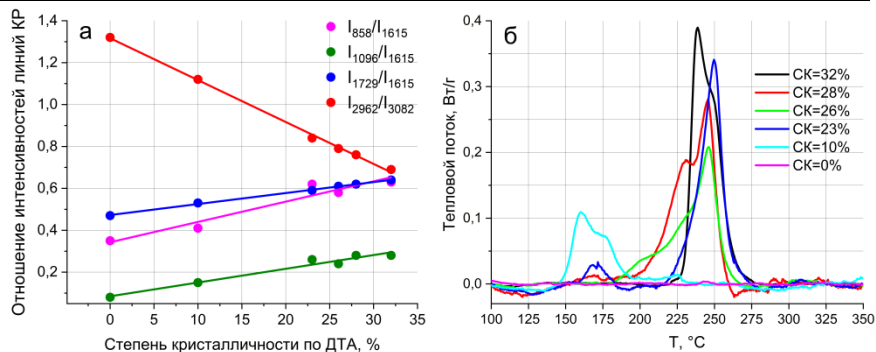


Рис. 2. Отношения интенсивностей линий КР (а) и пики плавления ПЭТ и ПЭТГ по данным ДТА (б) как функции степени кристалличности ПЭТ и ПЭТГ.

Таким образом, в работе выявлены наиболее чувствительные к степени кристалличности линии в спектрах КР и впервые предложено использование отношения интенсивностей линий КР ПЭТ и ПЭТГ с частотами 2962 и 3082  $\text{см}^{-1}$  в качестве меры их СК.

## Долговременная стабильность проводимости монокристаллов твёрдых растворов $(\text{ZrO}_2)_{0,90}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{(0,1-x)}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_x$

**Комаров Б.Е.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [boris.komarov.1998.2017@mail.ru](mailto:boris.komarov.1998.2017@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-114-116

Материалы для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) испытывают деградацию фазовых, структурных и транспортных характеристик в процессе эксплуатации при высоких рабочих температурах. Поэтому, одной из важнейших задач, способствующих решению проблемы повышения ресурса работы ТОТЭ, является создание материалов для электролитических мембран устойчивых к деградации при высоких температурах в течение длительного времени.

Процессы старения твёрдых электролитов, проявляющиеся в изменении их электропроводности при изотермическом отжиге, изучались на твёрдых растворах на основе диоксида циркония, стабилизированных оксидами различных редкоземельных элементов [1, 2]. Показано, что в общем случае существуют три независимые причины старения твёрдых электролитов на основе  $\text{ZrO}_2$ : распад твердого раствора с образованием новых фаз, упорядочение катионов и кислорода в кристаллической решетке твердого раствора и изменение электропроводности границ зерен. Целью данной работы являлось исследование долговременной стабильности проводимости монокристаллических электролитических мембран  $(\text{ZrO}_2)_{0,90}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,09}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0,01}$  (далее 9Sc1YbSZ) и  $(\text{ZrO}_2)_{0,90}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,08}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0,02}$  (далее 8Sc2YbSZ). Исследования проводились в течение 4800 ч при температуре 1123 К.

Кристаллы были получены методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере. Фазовый состав и структуру кристаллов до и после старения изучали методами рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Проводимость образцов измеряли методом импедансной спектроскопии.

Сопоставление данных о фазовом составе и проводимости полученных кристаллов с кристаллами  $(\text{ZrO}_2)_{0,90}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,10}$  (далее

10ScSZ), выращенными тем же методом и состоящими из смеси псевдокубической и ромбоэдрической фаз, показало, что замещение даже 1 мол.%  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  на  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  приводит к образованию однофазных кристаллов со структурой псевдокубической  $t''$ -фазы без снижения высокотемпературной проводимости материала. При дальнейшем замещении  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  на  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  данная структура сохранялась, а в высокотемпературной области наблюдалось снижение проводимости (рис. 1а).

Отжиг образцов 9Sc1YbSZ в течение 4800 ч при температуре 1123 К приводил к незначительному изменению высокотемпературной проводимости (степень деградации не превышала 4 %). Изменений в структуре этих образцов после отжига обнаружено не было. Характер изменения проводимости образца 8Sc2YbSZ заметно отличался от изменений проводимости 9Sc1YbSZ (рис. 1б). Резкое снижение ионной проводимости (на ~55 % от исходного значения) наблюдалось в течение первых 500 ч отжига. В дальнейшем наблюдалось постепенное снижение проводимости. Отжиг состава 8Sc2YbSZ привел к превращению исходной псевдокубической  $t''$ -фазы в тетрагональную  $t'$ -фазу.

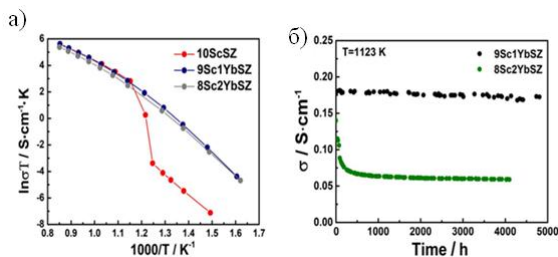


Рис. 1. Графики Аррениуса для проводимости кристаллов 9Sc1YbSZ, 8Sc2YbSZ и 10ScSZ (а) и деградация проводимости твёрдых электролитов 9Sc1YbSZ и 8Sc2YbSZ при 1123 К (б)

Замена  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  на  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  в композициях, содержащих суммарную концентрацию стабилизирующих оксидов ( $\text{Sc}_2\text{O}_3 + \text{Yb}_2\text{O}_3$ ) равную 10 мол.%, эффективно подавляет образование ромбоэдрической фазы и приводит к стабилизации псевдокубической структуры. Однако, полученные данные показали, что увеличение содержания  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  до 2 мол.% приводит к снижению стабильности высокосимметричной

фазы. Состав  $(\text{ZrO}_2)_{0,90}(\text{Sc}_2\text{O}_3)_{0,09}(\text{Yb}_2\text{O}_3)_{0,01}$  можно рассматривать как перспективный материал для практического использования в качестве твёрдого электролита в ТОТЭ.

Автор выражает благодарность научному коллективу лаборатории «Фианит» за постановку научной задачи, помощь в проведении измерений и обсуждении результатов.

1. Ciacchi F., Badwal S., J. Eur. Ceram. Soc. 1991, **7**, 197–206.
2. Lee D.-S., Kim W., Choi S., et al., Solid State Ionics. 2005, **176**, 33–39.

**Характеризация внутренней структуры  
тридецилата холестерина с добавлением углеродных наноструктур  
при помощи моделей сдвиговой вязкости  
неньютоновских жидкостей**

**Кучеров Р.Н.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [rn.kuchеров@gmail.com](mailto:rn.kuchеров@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-117-119

Мезоморфные вещества такие как холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) и их дисперсии с углеродными наноструктурами (УНС) находят всё новые области применения в электрооптических и электромеханических приложениях. В основе их применения лежит возможность перестраивания структуры ХЖК при приложении внешних воздействий. УНС, обладающие уникальными функциональными свойствами, служат в качестве модификатора для улучшения эксплуатационных свойств жидкокристаллической основы. Здесь возникает задача определения параметров, характеризующих внутреннюю структуру жидкокристаллического соединения, которые будут определять времена отклика и релаксации системы, её энергоэффективность. Мощным методом для этого является реологический метод, позволяющий определить вязкоупругий отклик системы при приложении внешнего колебательного воздействия. Однако существующие модели для неньютоновских жидкостей, таких как: дисперсные системы, эмульсии и расплавы полимеров и т.д., способные количественно описать поведение жидкокристаллической системы, могут некорректно описывать её структуру, ввиду различия механизмов вязкоупругого поведения системы. Поэтому в данной работе приводится анализ моделей сдвиговой вязкости применительно к описанию систем ХЖК/УНС для характеристики упорядочивания их внутренней структуры.

В качестве объекта исследования применимости моделей выбран холестерический жидкий кристалл тридецилат холестерина Х-20 и его дисперсии с УНС: малослойных графитовых фрагментов (МГФ) [1], шунгитового углерода (ШУ) [2] и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) [3]. Типичные зависимости

вязкоупругих свойств системы Х-20/УНС приведены на рис. 1 и описаны с использованием двух моделей сдвиговой вязкости для неньютоновских жидкостей: модели Кирсанова (дисперсных систем) [4] и модели Карро [5]. Обе модели с хорошей точностью описывают вязкоупругое поведение систем. При этом существует расхождение между данными, получаемые из эксперимента и его теоретического описания. Например, при высоких концентрациях ШУ в эксперименте наблюдается падение значений модулей сдвига, свидетельствующее о нарушении порядка в системе ввиду большого количества наночастиц в системе [2]. В рамках модели для дисперсных систем такое поведение будет являться следствием уменьшения параметра, характеризующего степень агрегации системы, что находится в расхождении с данными эксперимента.

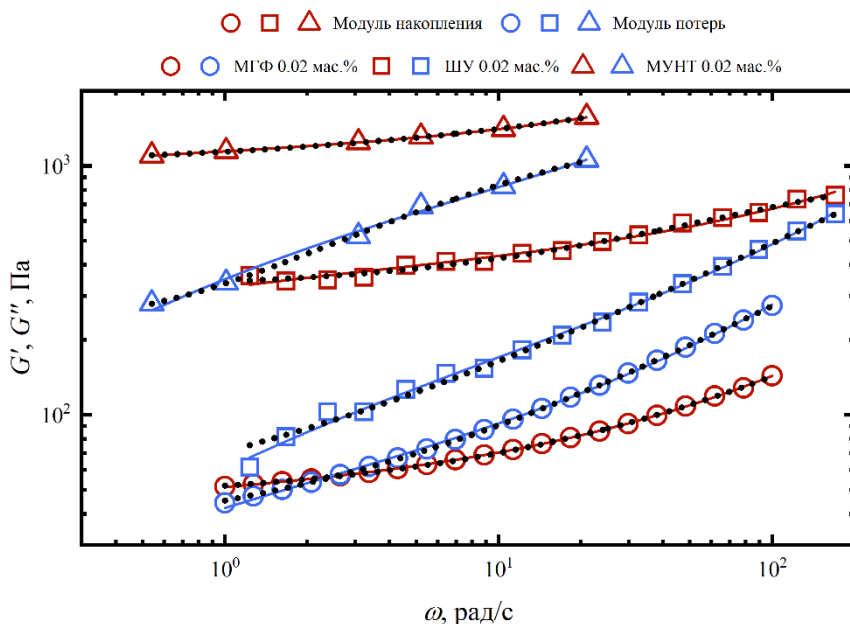


Рис. 1. Описание вязкоупругих параметров системы Х-20/УНС [2, 3] с использованием моделей для дисперсных систем (сплошные линии) и Карро (чёрные точки).

Таким образом, существующие модели сдвиговой вязкости неньютоновских жидкостей позволяют описать с определённой точностью внутренние структурные свойства системы Х-20/УНС.

Установлено, что для определённых моделей в данной задаче присутствуют ограничения их применимости: концентрация УНС выше критической, при превышении которой происходит сильное искривление структуры ХЖК, и высокая частота внешнего колебательного воздействия, выше которой разрушается структура жидкого кристалла, в частности X-20, вследствие чего система переходит в текучее состояние [6].

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Чаусову Д.Н. за помощь в постановке задачи и анализе результатов, а также д.х.н. Усольцевой Н.В. и Столбову Д.Н. за предоставление материалов для исследований. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, грант № FZZM-2023-0009.

1. Chausov D.N, Kurilov A.D., Smirnova A.I. et al., J. of Molec. Cryst. 2023, **374**, 121139.
2. Usol'Tseva N.V, Smirnova M.V., Kazak A.V. et al., J. of Frict. Wear. 2015, **36**, 380–385.
3. Usol'Tseva N.V, Smirnova M.V., Sotsky V.V. et al., J. of Phys.: Conf. Ser. 2014, **558**, 012003.
4. Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеев. Неньютоновское поведение структурированных систем, Техносфера, Москва, 2016.
5. Carreau P.J., J. of The Trans. Socie. Rheo. 1972, **16**, 99–127.
6. P.G. de Gennes. The Physics of Liquid Crystals, J. Prost, 1993.



## Исследование оптических градиентных волноводов на основе активного стекла

Муратов Д.А.<sup>1</sup>, Пустовалов А.В.<sup>2</sup>

1 - Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва

2- МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

E-mail: [a1p3@mail.ru](mailto:a1p3@mail.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-120-121

Градиентные оптические волноводы находят широкое применение в устройствах фотоники, таких как модуляторы переключатели, волноводные лазеры и др. К их достоинствам следует отнести низкие потери, простоту стыковки с оптическим волокном, а в случае волноводных лазеров и локализация поля в активной среде при одномодовом режиме распространения [1].

Экспериментальные образцы волноводов были изготовлены методом твердотельной диффузии оксида свинца в силикатном лазерном стекле ГЛС-6.

Для исследования параметров волноводного слоя и проведения расчетов полей волноводных мод была решена обратная задача определения параметров волновода на основе измеренных коэффициентов замедления. Решение этой задачи производили в вариационной постановке.

Возможны два варианта постановки задачи расчёта распределения показателя преломления в волноводном слое. В первом случае волновод поддерживает большое число мод, достаточное для определения параметров модельного распределения показателя преломления. Во втором случае волновод поддерживает одну-две моды, и измерения коэффициентов замедления проводят при различных временах диффузии. Выбор соответствующей математической модели диффузионного процесса позволяет определить параметры модельного распределения показателя преломления. Адекватность выбранной модели экспериментальным данным проверяют по отклонениям между расчётными и измеренными коэффициентами замедления.

Непосредственно минимизация целевой функции может быть осуществлена с использованием типовых методов, например,

встроенных в выбранную систему математического моделирования [2, 3].

В ходе решения обратной задачи был вычислен коэффициент диффузии  $D = (2,43 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>2</sup>/ч для температуры отжига 520 °С и нормировочные коэффициенты  $Q_{0,6328} = (3,28 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$  мкм,  $Q_{1,15} = (2,78 \pm 0,05) \cdot 10^{-2}$  мкм для волноводов с толщиной плёнки оксида свинца  $h=66$  нм на длинах волн 0,6328 и 1,15 мкм, соответственно. При этом в качестве модельной функции распределения показателя преломления  $n(x)$  была выбрана функция

$$n(x) = n_3 + \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}\right), \quad (1)$$

соответствующая классической задаче диффузии из бесконечно тонкого источника и линейной зависимости показателя преломления от концентрации диффузанта. Здесь  $n_3$  — показатель преломления подложки,  $D$  — коэффициент диффузии,  $t$  — время диффузии,  $Q$  — нормировочный коэффициент, зависящий от толщины плёнки и поляризуемости диффузанта.

1. Jia Y., Chen F. Compact solid-state waveguide lasers operating in the pulsed regime: a review [Invited] // Chin. Opt. Lett. 17 (2019).
2. Hertel P., Menzler H.P., Appl. Phys. B. 1987, **44**, 75–80.
3. Chiang K.S., Wong Ch.L., Optical Engineering. 2005, **44**(5), 054601.

## Исследование межволоконного пространства СВМПЭ волокон

**Некрасов И.К.<sup>1,2</sup>, Сагитова Ф.Р.<sup>3</sup>**

*1- Казанский федеральный университет*

*2- ООО «Плазма-ВСТ»*

*3- Казанский национальный исследовательский технологический университет*

E-mail: [igor05071997@mail.ru](mailto:igor05071997@mail.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-122-123

Одним из самых перспективных синтетических полимеров является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладающий уникальной комбинацией физико-механических свойств. Высокая удельная прочность и износостойкость нивелируются низкой адгезией СВМПЭ ко всем известным полимерным матрицам. Одним из известных методов модификации СВМПЭ с целью увеличения адгезии поверхности последнего является метод обработки потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления. Достигая увеличения поверхностной энергии СВМПЭ с помощью данного метода, удается сохранить физико-механические характеристики полимера. Межфиламентное пространство играет важную роль в процессе интегрирования наполнителя пропитывающей матрицей в композиционном материале. Представляет интерес в исследовании структуры межфиламентного пространства после обработки потоком низкоэнергетических ионов.

Для проведения исследования использовалась микро и нанофокусная исследовательская рентгеновская система для компьютерной томографии General Electric V|tome|X S 240. Единичный срез, толщиной в один воксел, называется слайс. Разрешение — величина, определяющая количество вокселей на единицу длины. Для микротомографических исследований пород разрешение съёмки для всех образцов составило 5,2 мкм. Исследование пучков волокон с использованием рентгеновской компьютерной томографии позволило получить данные о структуре образцов. Сравнение контрольного и обработанного образцов показало, что обработанный образец имеет меньший объём волокон, меньшую площадь поверхности волокон (в контрольном объёме 100×100×500 вокселей) и большую удельную площадь поверхности

волокон по сравнению с контрольным образцом, т.е. образец имеет большую поверхность при том же объеме. Эти изменения могут быть результатом воздействия обработки на структуру волокон.

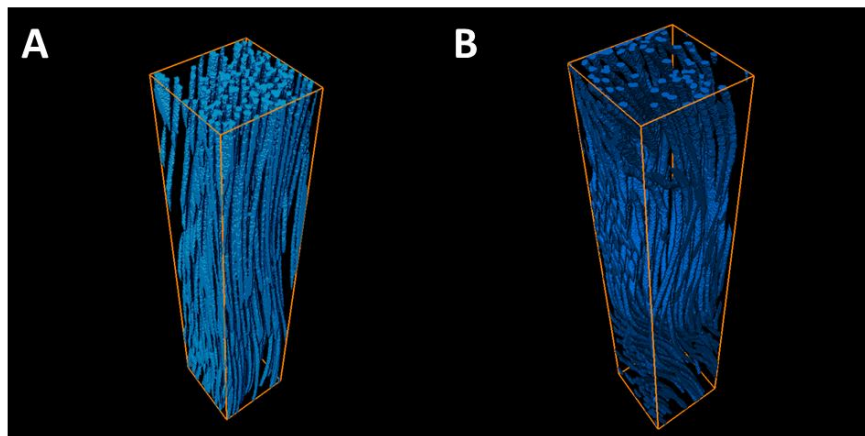


Рис. 1. Сегментированные структуры волокон:  
А — контрольный, В — обработанный образец

Согласно рис. 1 можно наблюдать, что в результате плазменной обработки происходит увеличение межволоконного пространства. Это приводит к улучшению пропитки наполнителя (СВМПЭ) полимерной матрицей, что в конечном счёте сказывается на свойствах получаемого композиционного материала, в котором прилагаемая нагрузка гораздо равномернее распределяется по наполнителю. Это предотвращает преждевременное разрушение наиболее контактирующих с матрицей волокон.

**Исследование электрических свойств  
и характеристика металлполимерного проводника  
на основе серебросодержащих нанопроволок**

**Панов Д.В.<sup>1</sup>, Волчков И.С.<sup>1</sup>, Ковалец Н.П.<sup>2</sup>, Подкур П.Л.<sup>1</sup>,  
Кошелев И.О.<sup>1</sup>**

*1- Курчатовский комплекс «Кристаллография и фотоника»*

*НИИ «Курчатовский институт», Москва*

*2- Московский педагогический государственный университет, Москва*

*E-mail: [dggamer@mail.ru](mailto:dggamer@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-124-126

Спрос на создание различных элементов гибкой электроники, таких как сенсоры и активные элементы на основе различных наноструктур, не ослабевает [1–6]. Исследования в области гибкой электроники становятся все более популярными в связи с огромными возможностями их применения в различных областях микро- и нанoeлектроники. Благодаря развитию технологий синтеза наноматериалов становится возможным производство композитных проводников. Среди композитных проводников можно выделить тонкопленочные многослойные проводники [3, 4, 6] и композитные проводники на основе наноструктур, как расположенных на поверхности пленок [5–7], так и интегрированных в объем [2, 3]. Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки. В данной работе будет рассмотрен гибкий полимерный композит с нанопроволоками (НП) серебра в объеме полимерного материала. Эти структуры могут быть использованы для всех типов оптоэлектронных интерфейсных устройств, таких как сенсорные экраны [3, 5, 6], солнечные элементы [3, 6] и светоизлучающие устройства [3]. Основными характеристиками таких гибких проводников являются хорошее удлинение, гибкость, механическая стабильность и химическая стойкость таких структур.

Для получения структур использовались промышленные трековые мембраны (ТМ) из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 12 мкм с порами диаметром 100 нм и плотностью пор  $1,2 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$  (ОИЯИ, Дубна, Россия). Для создания контактной поверхности медь напылялась на одну из полимерных поверхностей с помощью установки ВУП-4. Гальваническое осаждение серебра в поры мембраны проводили в вертикальной ячейке из ПЭТ с рабочей

площадью  $15 \text{ см}^2$ . Использовался серебряный электролит состава  $\text{AgNO}_3$  —  $0,177 \text{ моль/л}$ ;  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  —  $0,136 \text{ моль/л}$ ;  $\text{K}_2\text{CO}_3$  —  $0,289 \text{ моль/л}$ ;  $\text{KSCN}$  —  $1,029 \text{ моль/л}$ , при этом гальваническое осаждение проводилось при температуре электролита от  $20$  до  $25^\circ\text{C}$ , катодной и анодной плотности тока от  $1$  до  $10 \text{ мА/см}^2$  [8]. Образцы серии 1 выращивались при токе осаждения  $60 \text{ мА}$  в течение  $10 \text{ с}$  и обратном токе  $-70 \text{ мА}$  в течение  $6 \text{ с}$  за цикл в течение  $100$  циклов. Образцы серии 2 выращивались в аналогичных условиях в течение  $50$  циклов.

Длину полученных НП контролировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JCM 6000 Plus (Jeol, Япония) со встроенной приставкой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Исследования проводились в режиме вторичных электронов (напряжение  $15 \text{ кВ}$ ). Рентгенофазовый анализ (РФА) и расчет размера кристаллитов проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре X'pert Pro MPD (PANalytical, Нидерланды) при ускоряющем напряжении  $40 \text{ кВ}$  при токе  $40 \text{ мА}$  с медным излучением. ( $\text{CuK}\alpha = 1,54 \text{ нм}$ ).

Механические свойства образцов исследовались экспериментально в режиме одноосного растяжения ( $2 \text{ мм/мин}$ ) на испытательной машине Autograph AGS-5kN (Shimadzu, Япония).

Электрические характеристики массивов НП измерялись с помощью резистивного монитора Cresbox (Napson, Япония) стандартным четырехзондовым методом постоянного тока [9].

В данной работе были получены металлополимерные композиты с диаметром НП  $100 \text{ нм}$ . НП выращивались до того, как материал начал выходить на поверхность матрицы. При проведении СЭМ-исследований ЭДС-анализ проводился как с поперечного сечения матрицы, так и с поверхности матрицы.

В состав основных соединений проводящего композита на основе Ag также входят примеси Cl и I. Пик Cu относится к остатку подложки, который не полностью удален селективным травлением. Рентгеноструктурные исследования показали наличие не только фазы чистого серебра, но и наличие галогенидных фаз:  $\text{AgCl}$  и  $\text{AgI}$ . Измерения механических характеристик показали возможность упрочнения ТМ за счет формирования массива НП. Действительно, относительно исходной ПЭТФ-мембраны E и P выше у образцов серии 2. При этом наблюдается динамика линейного снижения значений механических характеристик с увеличением O.

Электрические свойства образцов серии 2 показали линейное увеличение с увеличением  $O$ , так как с увеличением доли площадей увеличивается и скорость роста НП, что приводит к образованию НП большей длины. Как известно, увеличение длины НП при использовании ТМ такого типа приводит к повышению электрических свойств. Именно это и наблюдается на образцах серии 2. Образцы серии 1 не показали зависимости электрических свойств от  $O$ . Наблюдаются как области с низкой проводимостью, возникающие вследствие описанных выше процессов образования и удаления наростов, так и проводящие участки, область наростов в которых, по-видимому, была не столь значительна, в результате чего измерительные зонды доходили до проводящей решетки. Это указывает на неоднородность роста НП.

Показана возможность формирования проводящего металлополимерного композита на основе серебросодержащих НП. Электрические свойства композитов зависят как от времени осаждения, так и от соотношения площадей анода и катода ( $S_{\text{анод}}/S_{\text{катод}}$ ). Полученные металлополимерные композиты имеют механические свойства, превосходящие свойства ПЭТФ ТМ. Однако с увеличением  $S_{\text{анод}}/S_{\text{катод}}$  и увеличением времени осаждения наблюдается падение этих значений из-за увеличения скорости роста, что приводит к образованию неоднородных по длине НП. Полученные данные свидетельствуют о том, что проводящие серебросодержащие НП могут служить армирующей структурой для проводящих металлополимерных композитов, обладающих высокой электропроводностью и перспективных для использования в гибких элементах электроники.

1. Goki E., Fanchini G., Manish C., Nature Nanotech., 2008, **3**, 270.
2. Ye S., Rathmell A.R., Chen Z. et al., Adv. Mater, 2014, **26**, 6670.
3. Langley D., Giusti G., et al., Nanotech., 2013, **24**, 452001.
4. Hecht D.S., Hu L., Irvin G., Adv Mater, 2011, **23**, 1482.
5. McCoul D., Hu W., Gao M., Mehta V., Advanced El. Mat, 2016, **2**.
6. Kumar A., Zhou P., ACS Nano, 2010, **4**, 11.
7. Mayousse C., Celle C., Moreau E. et al., Nanotech., 2013, **24**, 215501.
8. Burkat G.K. Electrodeposition of precious metals, SPB.: Polytech, 2009, p. 21.
9. Smits F.M., The Bell System Technical Journal, 1958, **37**, 711.

## Синтез прозрачных катодов для $\mu$ OLED дисплеев

Паращук Н.С.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [parashchuk.ns@mail.ru](mailto:parashchuk.ns@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-127-128

Одним из направлений исследований в области OLED устройств является уменьшение их размеров без потери пикселей, то есть разработка  $\mu$ OLED дисплеев. Проблемой  $\mu$ OLED является необходимость использования схемы «Top-Emitted», при которой верхний прозрачный катод наносится поверх органических слоёв, что ускоряет их деградацию при наличии неинертных газов и высоких температур [1]. Это исключает использование эталонного полупроводникового оксида индия-олова (Indium Tin Oxide, ITO), требующего  $O_2$  и высокотемпературного отжига [2].

Решением данной проблемы может являться применение однослойных металлических и многослойных соединений оксид/металл/оксид, позволяющих добиться высоких электрооптических показателей без неинертных газов и высоких температур. Для реализации данных тонкоплёночных структур были использованы магнетронный, термический и электронно-лучевой методы напыления, а параметры прозрачных катодов оценивались с помощью оптического пропускания  $T$ , поверхностного сопротивления  $R_{sheet}$  и выражения  $FoM = T \cdot R_{sheet}^{-0,1}$  [3].

В результате выполнения данной работы успешно синтезированы различные серии прозрачных электродов (рис. 1), включающие как оксидные полупроводниковые, так и многослойные структуры с содержанием Ag, Al, Mg [4]. Показано, что эффективность структур ITO/Ag/ITO и Mg:Ag/Ag, синтезированных без использования неинертных газов и высокотемпературных процессов, соответствуют эффективности однослойных ITO, параметры синтеза которых включал в себя использование неинертных газов и проведение отжига в кислородной атмосфере.



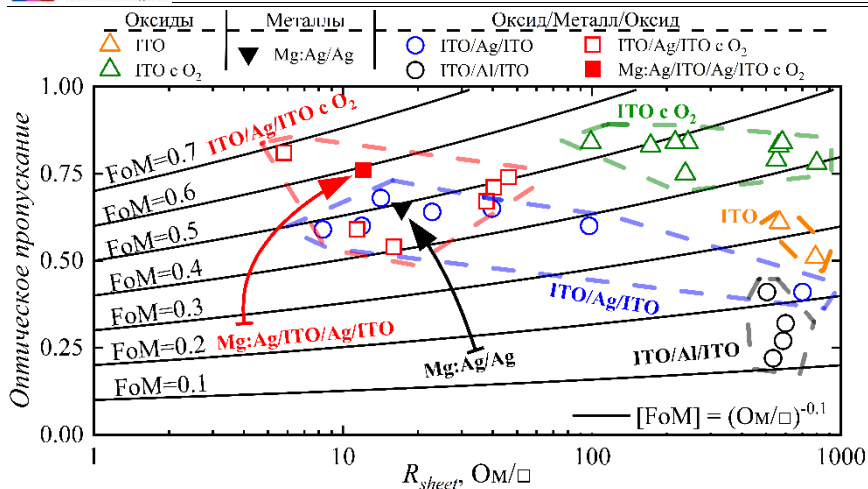


Рис. 1. Сравнение различных конфигураций прозрачных катодов с варьированием условий синтеза.

Работа подготовлена под руководством д.ф.-м.н. Чаусова Д.Н.

1. Vogel U. et al., Proc. of SPIE. 2017, **10335**, 1033503(12p).
2. Yang S. et al., Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2019, **30**(14), 13005–13012.
3. Anand A. et al., Adv Energy Mater. 2021, **11**(26).
4. Han J. et al. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2023, **249**, 112035.

## Реальные структура и свойства кристаллов CdTe с различным составом

**Подкур П.Л.<sup>1</sup>, Башлыков Н.А.<sup>1,2</sup>, Кошелев И.О.<sup>1</sup>, Волчков И.С.<sup>1</sup>**

*1- Курчатовский комплекс «Кристаллография и фотоника»*

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

*2- МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

*E-mail: [podkur.p@crys.ras.ru](mailto:podkur.p@crys.ras.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-129-131

Примесный состав — важнейший фактор, оказывающий влияние на применимость полупроводниковых материалов. Примеси оказывают влияние на все ключевые свойства полупроводников. Иногда сложно предсказать эффект, который окажет та или иная примесь, добавленная в том или ином количестве во время роста полупроводникового кристалла. В то же время чёткое представление о свойствах полупроводниковых кристаллов имеет важнейшее значение, так как спектр применения полупроводников широк, и затрагивает область высокоточных приборов. Таким образом, например, теллурид кадмия с различной лигатурой (например Zn или Cl), приводящий к образованию высокоомных кристаллов применяется при изготовлении высокоточных детекторов рентгеновского и гамма-излучений [1]. В случае детекторного применения материал подготавливают методом вырезания из слитка. Правильно вырезанные элементы оказывают влияние на качество изготавливаемых детекторов. В таком случае, значительную важность получают механические свойства полупроводниковых кристаллов, значимость которых неочевидна относительно целевого применения. В данной работе сравниваются твёрдости кристаллов теллурида кадмия с различными примесными компонентами, а также их структура.

В качестве объектов исследования выступают кристаллы CdTe, выращенные модифицированным методом Обреимова-Шубникова [2] в КККиФ НИЦ «Курчатовский институт». Образцы отличаются примесным составом и количеством избытка Cd. Для измерения твёрдости у каждого образца подготавливалась поверхность, образованная сколом по плоскостям спайности, такая поверхность соответствует кристаллографической плоскости (110). Под твёрдостью в данной работе подразумевается микротвёрдость.

Микротвёрдость определялась методом наноиндентирования [3] с помощью прибора "Наноскан 3Д" (Тисснум, Россия). Число твёрдости представляет собой усреднение по 75 отдельным индентам, выполненным на площади  $100 \times 100$  мкм в диапазоне нагрузок 1–70 мН. Структура образцов определялась методом рентгенофазового анализа с помощью порошкового рентгеновского дифрактометра Miniflex (Rigaku, Япония). Съёмка проводилась в геометрии Брэгга-Брентано, использовалось излучение медного катода с длиной волны  $1,54 \text{ \AA}$ . Напряжение трубки 40 кВ, ток 15 мА.

Исследование микротвёрдости показало, что примеси значительно влияют на твёрдость образцов, но характер влияния примесей на это свойство предсказать сложно. На рис. 1 представлена диаграмма, отражающая различия твёрдости измеренных образцов.

Рентгенофазовый анализ показал, что легирующие компоненты не приводят к образованию новых фаз, т.к. рефлексов продуктов реакции между легирующим компонентом и матрицей не обнаружено. В каждом образце зафиксировано смещение рефлексов относительно эталонных значений, вызванное изменением параметра решетки из-за добавления легирующей примеси или изменения соотношения компонентов матрицы. Полученные дифрактограммы представлены на рис. 2.

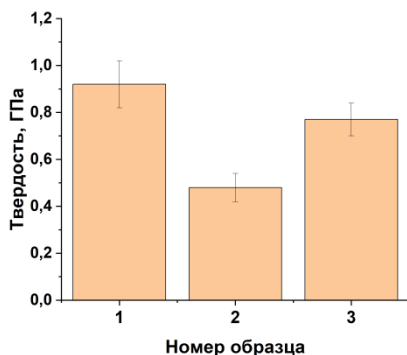


Рис. 1. Твёрдости образцов 1–3.

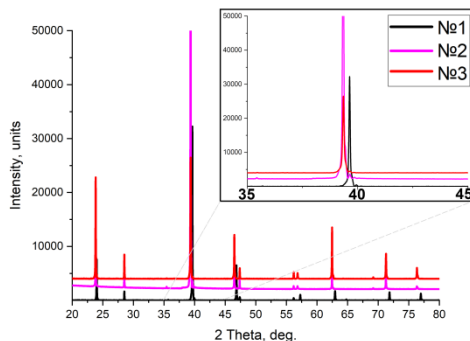


Рис. 2. Дифрактограммы образцов.  
На врезке для наглядности смещения представлен  
увеличенный диапазон углов от 35–45°.

Таким образом, обнаружено, что изменение лигатуры кристалла, а также соотношения матричных компонентов отражается на механических свойствах, причем изменение может носить неочевидный характер.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Каневскому В.М. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждении результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

1. Takeda S. Experimental study of a Si/CdTe semiconductor Compton camera for the next generation of gamma-ray astronomy // Ph. D. Thesis. University of Tokyo. 2009.
2. Ivanov Yu.M., J. Cryst. Growth. 1998, **194**, 309.
3. Oliver W.C., Pharr G.M. J. Mater. Res. 1992, **7**, 1564

**Влияние кристаллографической  
ориентации поверхности кристаллов  $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$   
на интенсивность низкотемпературной деградации**

**Таперо М.К.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

E-mail: [tapero.maksim@gmail.com](mailto:tapero.maksim@gmail.com)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-132-133

Материалы на основе диоксида циркония обладают высокой прочностью, твёрдостью, ударной вязкостью, износостойкостью, низким коэффициентом трения, высокой температурой плавления, химической инертностью и биосовместимостью. Сегодня применение материалов на основе диоксида циркония в медицине ограничено вследствие протекания процесса низкотемпературной деградации (низкотемпературного старения) — неконтролируемого медленного фазового перехода из метастабильной тетрагональной фазы в моноклинную. Фазовый переход может быть инициирован наличием влажной атмосферы даже при комнатной температуре и может привести к частичному или полному разрушению изделий из диоксида циркония (скальпелей, ортопедических и стоматологических имплантов).

Несмотря на значимость низкотемпературной деградации для медицинской практики и обилие экспериментальных данных, в литературных источниках на текущий момент нет единой точки зрения на механизм этого процесса. Поэтому определение факторов, влияющих на интенсивность низкотемпературной деградации в материалах на основе диоксида циркония, является актуальной задачей. В работе рассмотрено влияние условий термообработки в атмосфере водяного пара на фазовый состав, параметры кристаллической решётки, механические характеристики и относительное содержание гидроксильных групп ОН на поверхности кристаллов твёрдых растворов  $\text{ZrO}_2$  частично стабилизированных  $\text{Y}_2\text{O}_3$  с разной кристаллографической ориентацией.

Кристаллы  $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$  выращивали методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере с использованием прямого высокочастотного нагрева. Образцы для

исследований вырезали из кристаллов перпендикулярно направлениям  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . Термообработку кристаллов проводили в воде при температуре  $134^\circ\text{C}$  и при давлении 200 кПа. Время обработки составило 50, 100 и 200 ч, что эквивалентно 25, 30 и 35 годам нахождения имплантата из диоксида циркония в теле человека [1].

В работе показано, что относительное содержание гидроксильных ОН-групп на поверхности образцов  $(\text{ZrO}_2)_{0,97}(\text{Y}_2\text{O}_3)_{0,03}$  изменяется в зависимости от времени гидротермального старения, а также зависит от кристаллографической ориентации поверхности  $\text{ZrO}_2$ .

Для оценки механических свойств образцов использовали данные о микротвёрдости, измеренной методом Виккерса. При увеличении времени обработки до 100 ч изменение величины микротвёрдости незначительное и лежит в пределах погрешности измерения. После 200 ч обработки в автоклаве микротвёрдость снижается, что может свидетельствовать об образовании моноклинной фазы на поверхности образца.

Для определения толщины моноклинной фазы на поверхности образца использовали метод просвечивающей электронной микроскопии. Было установлено, что процесс низкотемпературной деградации начинается на поверхности образцов и затем распространяется на приповерхностные области объёма образцов. Глубина проникновения моноклинной фазы после 50 ч выдержки в автоклаве составила приблизительно 3,0, 1,5 и 1,0 мкм для монокристаллических образцов с ориентацией поверхности (100), (110) и (111) соответственно. При увеличении времени выдержки толщина слоя моноклинной фазы незначительно увеличивалась.

Таким образом обнаружено, что кристаллографическая ориентация образцов является существенным фактором, влияющим на процесс низкотемпературной деградации.

1. Chevalier J., Gremillard L., Deville S. Annual Review of Materials Research. 2007, **37**, 1–32.

**Свинцово-галлатные стёкла,  
легированные редкоземельными ионами,  
для применений в лазерах диапазона 2–3 мкм**

**Терехова А.Б.<sup>1</sup>, Бутенков Д.А.<sup>1</sup>, Рунина К.И.<sup>1</sup>, Болдырев К.Н.<sup>2</sup>**

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

*2- Институт спектроскопии Российской академии наук, Троицк, Москва*

*E-mail: [nastt2001@mail.ru](mailto:nastt2001@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-134-136

Стёкла на основе оксидов тяжёлых металлов, в частности свинцово-галлатные, обладают рядом уникальных свойств, среди которых наиболее востребованы хорошее пропускание в ближнем и среднем инфракрасных диапазонах (более 5 мкм) [1, 2], большой показатель преломления [3], низкая энергия фононов, химическая стойкость и термическая стабильность [4]. Такие материалы востребованы при создании хирургических лазеров и безопасного для зрения зондирования атмосферы [5, 6].

Стёкла синтезировали по стандартной методике закалки расплава. В качестве исходных реактивов использовали PbO и Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> чистотой не менее 99,9 мас.%. Шихты состава  $x\text{PbO}-(100-x)\text{Ga}_2\text{O}_3$  (где  $x = 70-90$ ) выдерживали в печи при температуре 1100 °С в течение 60 минут, затем расплав отливали в стальную форму. Далее проводился отжиг при  $T_g$ . Для исследований были изготовлены плоскопараллельные полированные пластины.

Спектры поглощения стёкол в диапазоне 190–2700 нм регистрировали на спектрофотометре JASCO V-770. Спектры поглощения в диапазоне 1,25–27,00 мкм регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Bruker Tensor 27.

На основании полученных спектров (рис. 1) установлено, что лучшим пропусканием (вплоть до 7,5 мкм) обладает образец 70PbO–30Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния, максимальная энергия фононов этого состава достигает 650 см<sup>-1</sup>, что для оксидных стёкол является рекордно низким значением. Именно эта матрица использована для дальнейшего легирования редкоземельными ионами (РЗИ) Er<sup>3+</sup>, Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>.

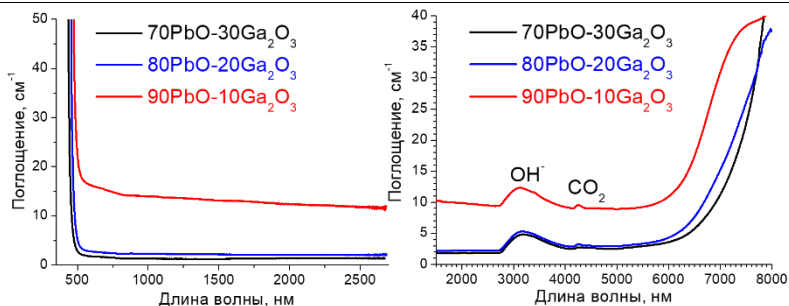


Рис. 1. Спектры поглощения свинцово-галлатных стёкол в УФ-ВИД-БИК диапазоне (слева) и среднем ИК-диапазоне (справа).

Спектры люминесценции в среднем ИК-диапазоне регистрировались на InSb детектор при различных возбуждениях. Полученные спектры люминесценции отображены на рис. 2.

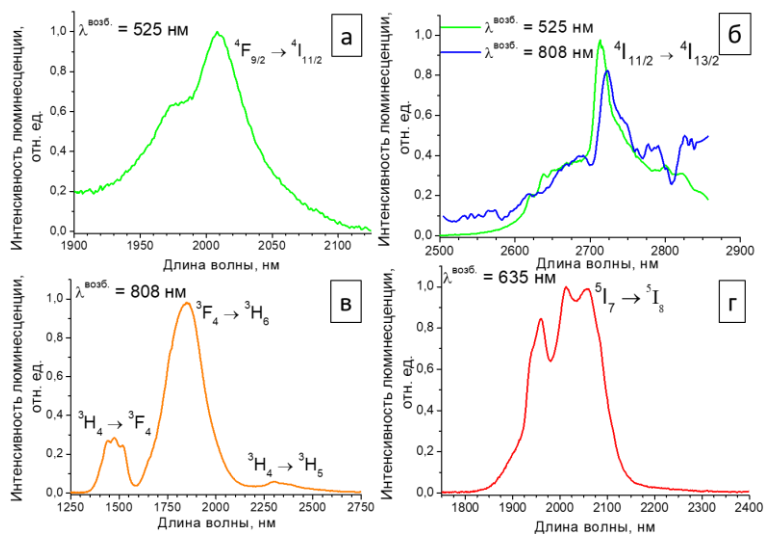


Рис. 2. Спектры люминесценции свинцово-галлатных стёкол, легированных ионами: а, б –  $\text{Er}^{3+}$ , в –  $\text{Tm}^{3+}$ , г –  $\text{Ho}^{3+}$ .

При возбуждении на 525 нм стекло, легированное ионами  $\text{Er}^{3+}$  (рис. 2а, б), проявляет полосы люминесценции с максимумами на длине волны около 2 и 2,7 мкм, принадлежащие переходам  $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$  и  $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ , соответственно [6, 7]. При возбуждении



этого же образца на 808 нм интенсивность перехода  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  снижается, а также незначительно смещается в сторону больших длин волн.

Стекло, активированное ионами  $Tm^{3+}$  (рис. 2в), при возбуждении на 808 нм проявляет пики люминесценции около 1,85 и 2,3 мкм, относящиеся к переходам  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  и  ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ , соответственно [8–10].

Образец, легированный Ho (рис. 2г), при возбуждении на 635 нм демонстрирует типичную для ионов  $Ho^{3+}$  интенсивную полосу люминесценции, принадлежащую переходу  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$  [5, 11].

В работе синтезированы и исследованы свинцово-галлатные стёкла. Показано, что легирование РЗИ делает их перспективными люминесцентными и лазерными материалами для области спектра 2–3 мкм.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, профессору, д.х.н. Петровой О.Б. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Shelby J.E., J. Am. Ceram. Soc. 1988, **71**(5), 254–256.
2. Lapp J.C., Dumbaugh W.H., Powley M.L., Properties and Characteristics of Optical Glass II. 1990, **1327**, 162–170.
3. Miyaji F., Tadanaga K., Sakka S., Bulletin of the Institute for Chemical Research. 1992, **69**(5-6), 495–510.
4. Shearer A., Hauke B., Montazerian M. et al., Opt. Mater. 2023, **X**, 100258.
5. Wang N., Cao R., Cai M. et al., Optics & Laser Technology. 2017, **97**, 364–369.
6. Zhang J., Wang R., Wang X. et al., J. Lumin. 2021, **238**, 118301.
7. Henderson-Sapir O., Jackson S.D., Ottaway D.J., Opt. Lett. 2016, **41**(7), 1676–1679.
8. Denker B.I., Dorofeev V.V., Galagan B.I., et al., Appl. Phys. B. 2018, **124**, 1–8.
9. Loiko P., Doualan J.L., Guillemot L. et al., J. Lumin. 2020, **225**, 117279.
10. Doualan J.L., Girard S., Haquin H. et al., Opt. Mater. 2003, **24**(3), 563–574.
11. Shi D.M., Zhang Q.Y., J. Appl. Phys. 2008, **104**(12), 123517.

**Новые люминесцентные композитные материалы  
на основе CVD алмаза:  
синтез, морфология и оптические свойства**

**Тяжелов И.А.<sup>1,2</sup>, Мартьянов А.К.<sup>1</sup>, Ермакова Ю.А.<sup>1</sup>,  
Александров А.А.<sup>1</sup>, Седов В.С.<sup>1</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва*

*E-mail: [tiazhelov@rambler.ru](mailto:tiazhelov@rambler.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-137-138

Для исследования кристаллических структур различных веществ активно используются мощные источники сфокусированного рентгеновского излучения, такие как синхротроны и лазеры на свободных электронах [1]. Увеличение выходной мощности таких источников диктует необходимость разработки стойких под воздействием высокоэнергетических пучков сцинтилляторов. Используемые в настоящее время рентгенолюминесцентные экраны склонны к быстрой деградации в силу своей низкой теплопроводности (к примеру, LiF обладает теплопроводностью  $\sim 4 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ ) [2]. Ранее нами был предложен новый подход к созданию визуализаторов в виде композитного материала, состоящего из прозрачной матрицы поликристаллического CVD алмаза (теплопроводность которого составляет  $\sim 2100 \text{ Вт/(м}\times\text{К)}$ ) с встроенными люминесцентными частицами [3].

В данной работе изучались отдельные особенности формирования композитного люминесцентного материала (рис. 1): (i) влияние отжига рентгенолюминесцентных частиц с ионами Eu и Ce в СВЧ плазме (в условиях роста алмаза) на их люминесцентные свойства; (ii) влияние размера (от 5 до 500 нм) и дзета-потенциала затравочных алмазных наночастиц на способность формирования ими сплошного алмазного покрытия и экранирования люминесцентных частиц от влияния СВЧ плазмы.

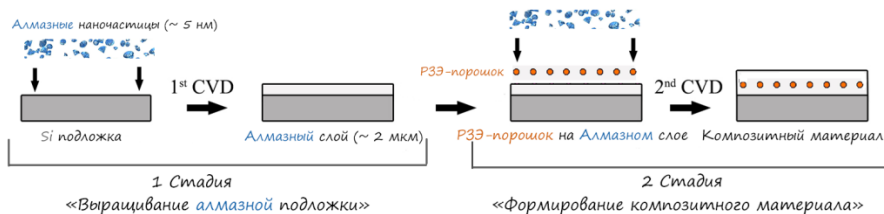


Рис. 1. Схема процесса формирования композитного люминесцентного материала.

Были зарегистрированы спектры фото- и рентгенолюминесценции отожжённых в СВЧ плазме порошков  $\text{EuF}_3$ ,  $\text{SrF}_2\text{:Eu}$  и  $\text{YAG:Ce}$ , а также композитных алмазных плёнок на их основе. В случае европий-содержащих соединений методами рентгенофазового и люминесцентного анализов доказано протекание процессов частичного восстановления  $\text{Eu}^{3+}$  до состояния  $\text{Eu}^{2+}$ . На основе полученных с помощью растровой электронной микроскопии микрофотографий поверхности и сколов синтезируемых композитов была доказана полная инкапсуляция люминесцентных частиц в объём алмаза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-13-00401. <https://rscf.ru/project/22-13-00401/>.

Авторы выражают благодарность к.х.н. Кузнецову С.В. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

1. Stöckler L.J., Krause L., Svane B., et al., IUCrJ. 2023, **10**, 103–117.
2. Okada G., Yanagida T., Nanto H., et al., in Phosphors for Radiation Detectors (Eds. T. Yanagida, M. Koshimizu), Wiley, 2022, 247–281.
3. Kuznetsov S.V., Sedov V.S., Martyanov A.K., et al., Inorganics. 2022, **10**, 240(9pp).

## Исследование и характеристика структуры нанопроволок FeCoCu

**Улыбышев Д.А.<sup>1</sup>, Хайретдинова Д.Р.<sup>1,2</sup>, Долуденко И.М.<sup>2</sup>,  
Волчков И.С.<sup>2</sup>**

*1- Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва*

*2-Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова,*

*Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники*

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

*E-mail: [m2103169@edu.misis.ru](mailto:m2103169@edu.misis.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-139-141

Магнитные нанопроволоки (НП) представляют большой интерес для исследований из-за своих уникальных свойств, обусловленных их размером, а также широкой областью применения. Матричный синтез считается наиболее эффективным способом получения массивов нанопроволок. Данный метод позволяет контролировать размер и форму НП, а также регулировать их магнитные свойства путем изменения состава сплава и условий осаждения.

В работе исследовалась зависимость состава трехкомпонентных НП FeCoCu от условий осаждения и состава электролита. НП получались методом матричного синтеза в поры полимерной трековой мембраны с диаметром пор 100 нм и 30 нм. Процентное содержание ионов Fe, Co и Cu в первом электролите составляло 71,5 %, 27,5 % и 1 %, а во втором — 65,5 %, 33,6 % и 0,9 % соответственно.

Осаждение НП проводилось в диапазоне напряжений от 0,9 В до 2,0 В. Время окончания осаждения определялось суммарным протекшим зарядом, который для всех экспериментов был равен 2,5 Кл. Исследование образцов проводилось методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и рентгенофазового анализа (РФА).

Результаты ЭДС показали (рис. 1, 2), что для обоих составов электролита содержание элементов в НП имеет нелинейную зависимость. При малых напряжениях осаждения происходит преимущественное осаждение Cu, что обуславливается наибольшим электродным потенциалом меди. Существует критическое напряжение осаждения равное 1,1 В, при котором для всех составов

наблюдается увеличение содержания магнитных металлов в составах НП. При этом, стоит отметить, что для НП с диаметром 30 нм выход на плато более резкий и дальнейшее изменение концентрации компонентов в НП незначительное. Помимо этого, наблюдается эффект аномального соосаждения железа, проявляющегося в увеличении содержания Fe в НП относительно концентрации  $\text{Fe}^{2+}$  в электролите.

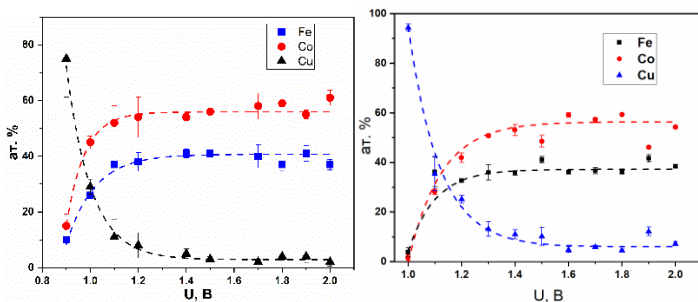


Рис. 1. Первый состав электролита для диаметра пор с размером 30 и 100 нм соответственно.

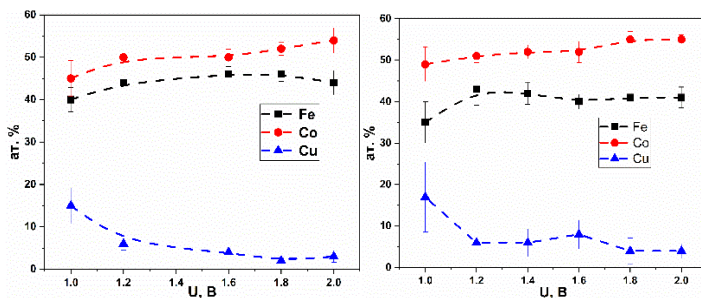


Рис. 2. Второй состав электролита для диаметра пор с размером 30 и 100 нм соответственно.

Результаты РФА показали, что FeCoCu НП имеют достаточно сложный фазовый состав. На рентгеновских спектрах (рис. 3) присутствует пик, соответствующей пику FeCo, однако этот пик смещается в зависимости от содержания Cu в составе НП. Можно предположить образование фаз FeCu и CoCu, однако фаза FeCu является метастабильной и для её выявления требуется произвести дополнительные эксперименты. Также на спектрах присутствует пик

Ag, и для более подробного анализа требуется произвести РФА исследования для образцов без подложки.

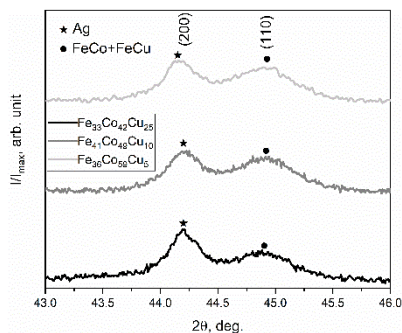


Рис. 3. Пример дифрактограммы FeCoCu

В результате исследования показано, что НП из тройной системы FeCoCu имеют сильную концентрационную зависимость от напряжения осаждения и геометрии матриц. Кроме этого, кристаллическая структура образцов представляет отдельный интерес для изучения ввиду неочевидных особенностей формирования фаз в ходе электрохимического осаждения. Совокупность этих двух факторов может сильно влиять на физические свойства таких НП, в том числе магнитные и электрические.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Паниной Л.В. и к.ф.-м.н. Загорскому Д.Л. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов. Работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт», обработка данных ЭДС проведена на базе НИТУ МИСиС.

## **Влияние особенностей получения нанопроволок FeCo методом матричного синтеза на их структуру и магнитные свойства**

**Хайретдинова Д.Р.<sup>1,2</sup>, Долуденко И.М.<sup>2</sup>, Волчков И.С.<sup>2</sup>**

*1-Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва*

*2-Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова*

*Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники*

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва*

*E-mail: [hairetdr@gmail.com](mailto:hairetdr@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-142-145

Нанопроволоки (НП) из ферромагнитных материалов могут использоваться во множестве применений: в качестве постоянных микромагнитов, функциональных материалов для применения в электронике, спинтронике и медицине [1, 2]. Одним из способов получения массивов НП является матричный синтез. Особенностью метода является возможность контроля свойств НП с помощью регулировки режимов их получения, а также с помощью изменения геометрии матриц [3]. Такие НП могут иметь достаточно сложные и неоднозначные механизмы перемангничивания, а также проявлять свойства, отличные от схожих объемных или наноструктур.

В данной работе были исследованы структурные и магнитные свойства FeCo НП, полученных методом матричного синтеза в порах трековых мембран из полиэтилентерефталата с различными диаметрами ( $d$ ): 100 нм, 65 нм, 30 нм. Для получения НП использовался электролит, содержащий ~43 %  $\text{Fe}^{2+}$  и ~57 %  $\text{Co}^{2+}$ .

Рост НП проводился в гальванической ячейке при постоянном напряжении 1,5 В. Были получены НП с различными длинами ( $h$ ): для этого контролировалось время их осаждения ( $t$ ). Исследования  $h$  проводились методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Рентгенофазовый анализ (РФА) был проведен с помощью порошкового дифрактометра с излучением  $\text{Cu}_{K\alpha}=0,154$  нм. Магнитные свойства структур были изучены методом вибрационной магнитометрии в ориентации вдоль ( $IP$ ) и поперек ( $OOP$ ) плоскости образцов.

Анализ результатов РЭМ показал, что  $h$  нелинейно зависит от  $t$ . При этом для различных  $d$  зависимость  $h(t)$  не одинакова (рис. 1). Сравнение аналитически определенных  $h(t)$  с экспериментальными

значениями показало нелинейность выхода реакции, связанную с наличием побочных реакций в ходе электроосаждения и особенностями заполнения ограниченного объёма пор.

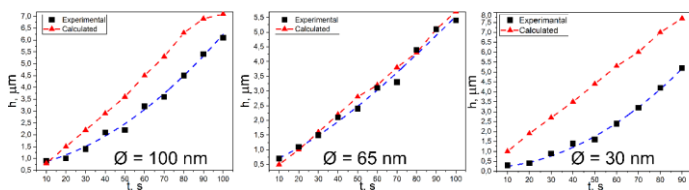


Рис. 1. Зависимость  $h$  FeCo НП различных диаметров от их времени роста  $t$ .

Результаты РФА показали, что в НП присутствует отклонение содержания Fe по  $h$  (рис. 2), что может быть связано с эффектом аномального соосаждения Fe и с диффузионными различиями ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Co}^{2+}$  в ограниченном объеме. При этом отклонение содержания Fe по длине имеет нелинейный характер, что наиболее ярко выражено для  $d=100$  нм. Для  $d=65$  нм этот эффект менее выражен и обладает более монотонной зависимостью, в то время как для  $d=30$  нм практически по всей  $h$  образуется эквиатомная фаза твёрдого раствора FeCo. Расчёт размера областей когерентного рассеяния (ОКР) показал, что он также нелинейно изменяется по мере роста НП, что может подтвердить неравномерность скорости роста структур, связанную с процессами осаждения ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в ограниченный объём поровых каналов.

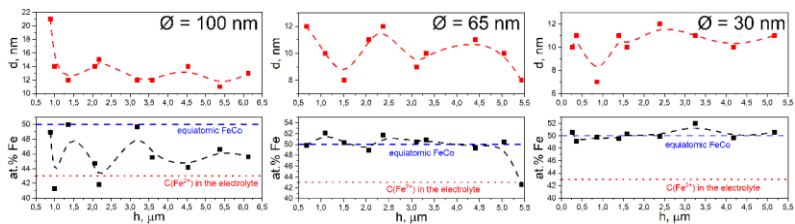


Рис. 2. Зависимость размера ОКР и содержания Fe по длине НП различных диаметров.

Методом вибрационной магнитометрии были определены коэрцитивная сила ( $H_c$ ) и приведенная остаточная намагненность ( $M_r/M_s$ ) (рис. 3). Для  $d=100$  нм преобладает влияние дипольного магнитного взаимодействия. Значение  $H_c$  возрастает в направлении IP, при этом  $M_r/M_s$  имеет достаточно сложный характер, однако



высокие значения также преобладают в этом направлении. Для  $d=65$  нм наблюдается «конкуренция» между магнитной анизотропией формы и диполь-дипольным взаимодействием. Для данных НП ось легкого намагничивания (ОЛН) располагается в направлении ООР, при этом наблюдается более монотонное увеличение  $H_c$  и  $M_r/M_s$  по мере увеличения  $h$ . Для  $d=30$  нм значения  $H_c$  и  $M_r/M_s$  в направлении ООР, больше, чем в направлении ИР для всех  $h$ . Это говорит о том, что ОЛН таких структур лежит в направлении ООР, а вклад диполь-дипольного взаимодействия мал.

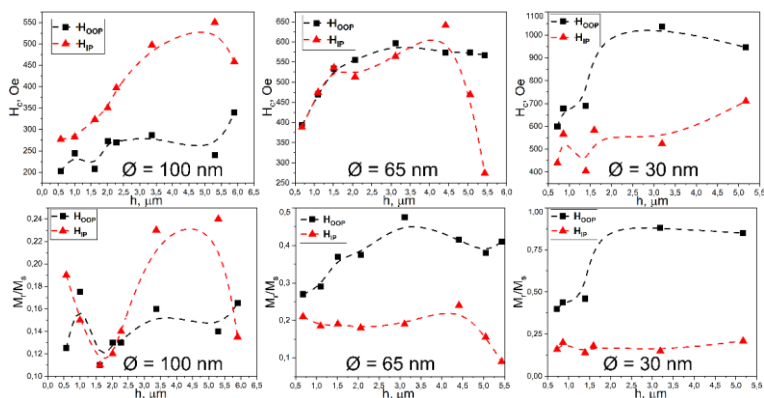


Рис. 3. Зависимость а)  $H_c$  и б)  $M_r/M_s$  от длины НП различных диаметров.

Таким образом, варьируя диаметр и длину НП, можно регулировать их магнитные и структурные свойства в широком диапазоне, получая как магнитомягкие материалы с ОЛН, лежащей в плоскости образцов, так и магнитожесткие материалы с одноосной магнитной анизотропией. Полученные данные могут позволить получать структуры с заданными параметрами для многих приложений.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Паниной Л.В. и к.ф.-м.н. Загорскому Д.Л. за постановку научной задачи и обсуждение результатов. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский Институт». Магнитные измерения проведены на базе НИТУ МИСиС.

1. Moreno J.A., Bran C., Vazquez M. et al., IEEE Trans. Mag. 2021, 57, 800317.

2. Naud C., Thebault C., Carriere M. et al., *Nanoscale Adv.* 2020, **2**, 3632.
3. Panina L.V., Zagorskiy D.L., Shymaskaya A. et al., *Phys. Status Solidi A.* 2022, **219**, 2100538.

## Электрооптические параметры нематического жидкого кристалла с наночастицами золота

**Чекулаев И.С.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [Chekulaev.I.S@yandex.ru](mailto:Chekulaev.I.S@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-146-148

Недисплейное применение жидкокристаллических композитов активно развивается в современной жизни, на их основе производятся антенны 5G, приборы для диагностики заболеваний и инфекций и многое другое. В связи с развитием новых направлений применимости жидких кристаллов растут и потребности в получении наилучших эксплуатационных характеристик разрабатываемых устройств. Основным направлением улучшения параметров жидкокристаллических систем является добавление наноразмерных частиц. В рамках проводимого исследования было установлено, что наночастицы золота являются привлекательными в качестве допантов, так как происходит снижение температуры просветления на 1 К и улучшение электрооптических параметров [1–2]. При этом ранее не проводилось исследований по влиянию золотых наночастиц на дисперсию анизотропии показателя преломления в широком диапазоне температур.

В рамках данной работы было проведено исследование влияния золотых наночастиц на электрооптические параметры нематического жидкого кристалла (НЖК) ЖК-1289. Исследование проводилось в широком диапазоне длин волн (480–700 нм) и температур (от 242 К до перехода в изотропное состояние). Установлено, что при добавлении золотых наночастиц происходит смещения температуры просветления нематической жидкокристаллической смеси. В том числе определены следующие электрооптические параметры: анизотропия показателя преломления и пороговое напряжения Фредерикса. Использование современного подхода к исследования электрооптических параметров жидких кристаллов позволило построить дисперсионные зависимости анизотропии показателя преломления от температуры.

Исследование параметров ЖК-1289 с наночастицами проводилось с помощью разработанной установки, основанной на

классическом электрооптическом методе [3–4]. Данная установка позволяет в автоматическом режиме проводить измерения, снижая погрешность в определении параметров жидкокristаллических смесей.

В результате работы были получены вольт-контрастные характеристики нематического жидкого кристалла с наночастицами золота при разных длинах волн, представленные на рис. 1. На основе данных вольт-контрастных характеристик производится расчёт электрооптических параметров жидкого кристалла при различной концентрации наночастиц золота.

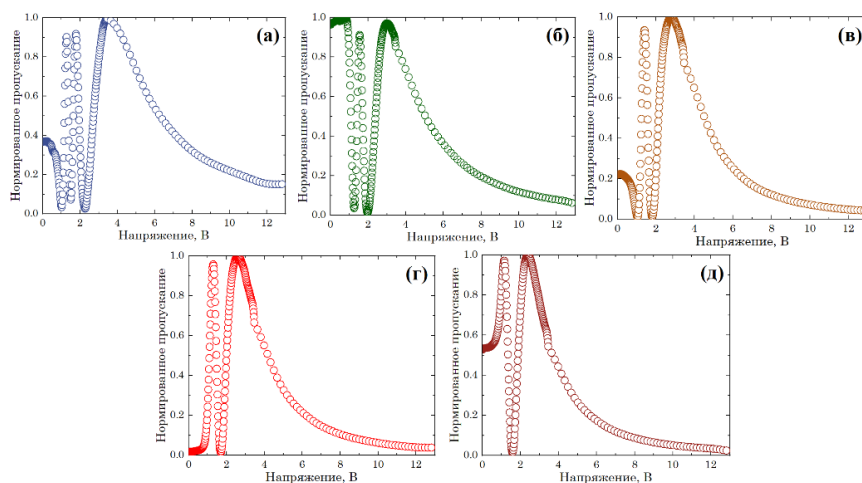


Рис. 1. Вольт-контрастные характеристики жидкокristаллической смеси ЖК-1289 с наночастицами золота (0,003 мас.%) на разных длинах волн: 480 (а), 530 (б), 590 (в), 632,9 (г) и 700 нм(д).

Установлено влияние золотых наночастиц на температуру просветления нематической жидкокristаллической смеси ЖК-1289, так при концентрации золотых наночастиц в области 0,003 мас.% происходит снижение температуры просветления на 1 К, дальнейшее увеличение концентрации до 0,03 мас.% приводит к снижению уже на 8 К, что связано с нарушением молекулярного порядка жидкокristаллической системы. Полученные термограммы нематической жидкокristаллической смеси ЖК-1289 с разной концентрацией наночастиц представлены на рис. 2.

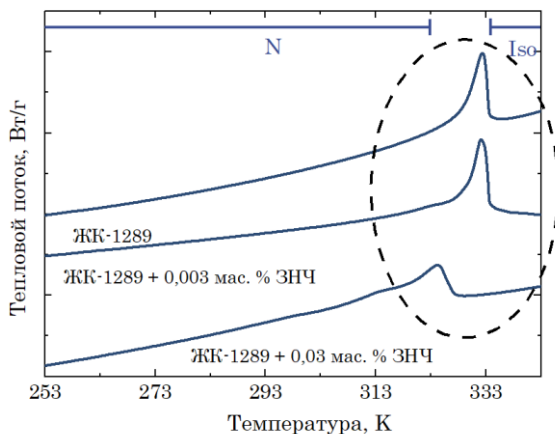


Рис. 2. Термограммы жидкокристаллического композита с наночастицами золота

Анализируя полученные значения дисперсии анизотропии показателя преломления, порогового напряжения Фредерикса, температуры просветления, определено, что оптимальной концентрацией для легирования жидкокристаллического композита является 0,003 мас.%, так как происходит снижение порогового напряжения Фредерикса на 15 %, при малом изменении анизотропии показателя преломления во всём исследуемом диапазоне температур и длин волн, и снижении температуры просветления на 1 К.

Работа подготовлена под руководством д.ф.-м. н. Чаусова Д.Н.

1. Mishra M. et al. Liquid Crystals. 2015, **42**(11), 1580–15902.
2. D.N. Chaurov, A.D. Kurilov, R.N. Kuchero, et al., Journal of Physics: Condensed Matter. 2020, **32**(39), 395102.
3. Чекулаев И.С., Курилов А.Д., Буланова Т.А. и др. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2024, (3), 9–14.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №202368839. Российская Федерация Программа для автоматического измерения и расчёта электрооптических параметров жидкокристаллических материалов / Н.С. Парашук, И.С. Чекулаев, А.Д. Курилов, Д.Н. Чаусов, В.В. Беляев, В.В. Усачев; № 2023687917; заявл. 15.12.2023; опубл. 21.12.2023.

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## Образование кристаллических структур (Mo/W) при воздействии микроволнового излучения на порошки

**Гаянова Т.Э.<sup>1</sup>, Резаева А.Д.<sup>1</sup>, Козак А.К.<sup>1</sup>,  
Соколов А.С.<sup>1</sup>, Образцова Е.А.<sup>1,2</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)», Долгопрудный*

*E-mail: [tatyanagayanova97@gmail.com](mailto:tatyanagayanova97@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-149-151

Кристаллические структуры тугоплавких металлов (молибден, вольфрам) являются одними из перспективных материалов, которые рассматриваются в качестве материалов компонентов экспериментальных установок термоядерного синтеза [1, 2]. Исследование этих структур является важной задачей. Известно, что в настоящее время предполагается использовать кристаллический вольфрам в качестве материала дивертора ИТЭР [3], а молибден уже используется и исследуется на токамаке EAST для стенки тороидальной камеры [2]. Исследование кристаллических структур таких тугоплавких металлов как молибден и вольфрам является актуальной задачей. Целью данной работы является синтезирование кристаллических структур Mo и W при воздействии импульсного микроволнового излучения, инициированного гиротроном в смесях порошков двух металлов Ni, Mo/W, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Эксперимент проводился на плазмохимическом стенде с мощным импульсным гиротроном. Описание стенда представлено в работе [4]. Мощность и длительность СВЧ-импульса гиротрона составляла 400 кВт и 8 мс. В эксперименте производилось по пять импульсов на образец, в каждом из которых наблюдался СВЧ-разряд и развитие плазмохимических процессов (рис. 1). На рис. 1 представлены результаты свечения в реакторе во всех пяти импульсах, наблюдаемых через боковой патрубок над порошком. Диапазон длин волн в наблюдаемых спектрах 300–800 нм. Процессы синтеза происходят над порошком в смеси плазмы, газа и частиц. Температура газовой-плазменной смеси от 4500 до 5200 К по результатам экспериментов с молибденом [5].

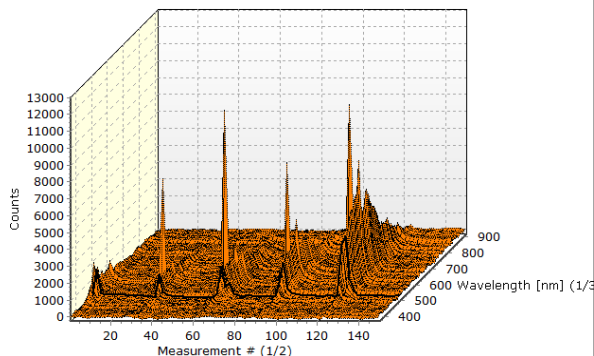


Рис. 1. Свечение в реакторе в течение 5 импульсов гиротрона (интервал между импульсами около 1 с).

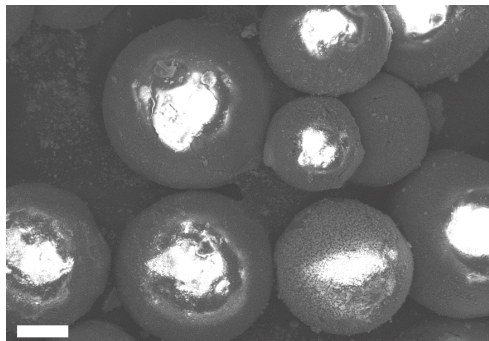


Рис. 2. РЭМ изображение образца смеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с Ni/Mo после синтеза.

Пример частиц смеси  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с Ni/Mo, полученных после плазмохимического синтеза показан на рис. 2. Синтезированный образец представляет собой сферические частицы микронного размера оксида алюминия с наноструктурированным покрытием из частиц никеля и молибдена. Рентгенофазовый анализ также показал наличие кубических структур металлов (рис. 3) в образцах после синтеза.

Таким образом, было показано, что в результате воздействия микроволнового излучения на порошки смесей двойных металлов Ni и (W/Mo) металлы кристаллизуются в кубическую форму. Данный результат является важным основанием для дальнейших исследований с тугоплавкими металлами (Mo/W).

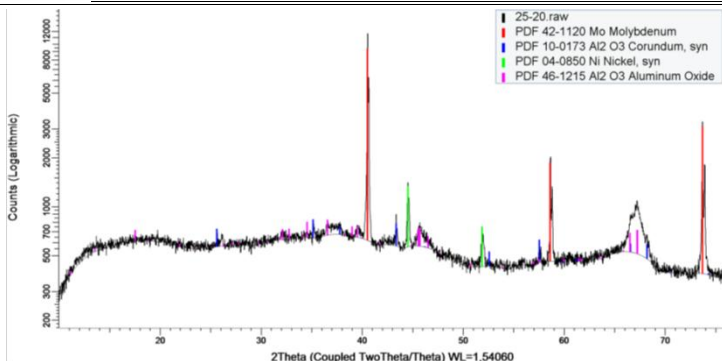


Рис. 3. Дифрактограмма образца  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с Ni/Mo.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Скворцовой Н.Н. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., et al., J. Nucl. Mater. 2013, **438**, 48–56.
2. Jiangang Li, Guangnan Luo, Rui Ding, et al., Royal Swedish Academy of Sciences Physica Scripta Phys. Scr. 2014, **159**, 014001 (7pp).
3. [www.iter.org](http://www.iter.org)
4. Соколов А.С., Ахмадуллина Н.С., Борзосеков В.Д. и др., Известия вузов. Радиофизика, 2022, **LXV**(11), 927–942.
5. Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., Малахов Д.В., Известия вузов. Радиофизика. 2015, **LVIII**(9), 779–788.



## Прямая конверсия углекислого газа в плазме коронного разряда

Дегтярев К.Н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: [k.degtvarev@bk.ru](mailto:k.degtvarev@bk.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-152-154

Актуальность задачи прямого разложения  $\text{CO}_2$  отражена в многочисленных работах учёных, ищущих высокоэффективные и экономически рентабельные технологии разложения чистого  $\text{CO}_2$ .

Одним из путей решения проблемы утилизации углекислого газа является организация замкнутого цикла использования  $\text{CO}_2$  в технологических процессах [1–3]. Предлагается углекислый газ раскладывать до монооксида углерода, который используется для получения синтез-газа — важного сырья химической промышленности [4–5]. Необходимые условия для разложения  $\text{CO}_2$  могут быть достигнуты в плазмохимических процессах, основанных на использовании электрических разрядов [1–6]. Среди особенностей плазмохимического метода выделяют низкие энергозатраты, компактность газоразрядных устройств и малую материалоемкость [7].

Сравнительной характеристикой эффективности разложения углекислого газа являются степень конверсии  $\text{CO}_2$   $\alpha(\%)$  и энергоэффективность устройства  $\text{CO}_2$   $\eta(\%)$ . Конверсия характеризует отношение числа разложенных молекул  $\text{CO}_2$  к их исходному количеству и выражается формулой:

$$\alpha(\%) = \frac{G^{\text{CO}_2}(\text{вх}) - G^{\text{CO}_2}(\text{вых})}{G^{\text{CO}_2}(\text{вх})} \times 100\%. \quad (1)$$

Энергоэффективность рассчитывается по формуле:

$$\eta(\%) = \alpha(\%) \times \frac{\Delta H_{298, \text{ев}}^0(\text{OC} - \text{O})}{E_m^{\text{ев}}}. \quad (2)$$

Для барьерного разряда полученные в экспериментах значения  $\alpha$  и  $\eta$  не превышают 70 % и 23 %, соответственно [7]. Там же отмечается возможность улучшения характеристик двумя различными способами: совершенствованием конструкции разрядного устройства и применением плазменно-каталитических систем.

Целью доклада является обсуждение перспективных направлений проектирования разрядных устройств и технологических систем для разложения углекислого газа в коронном разряде.

В настоящем докладе будут представлены состав, описание основных узлов и принцип работы лабораторной установки для разложения  $\text{CO}_2$  в низкотемпературной плазме коронного разряда, которая находится на кафедре Э4 МГТУ. На ней будет реализован плазменно-каталитический процесс, состоящий из двух этапов, и позволяющий синтезировать из  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  газообразные алканы.

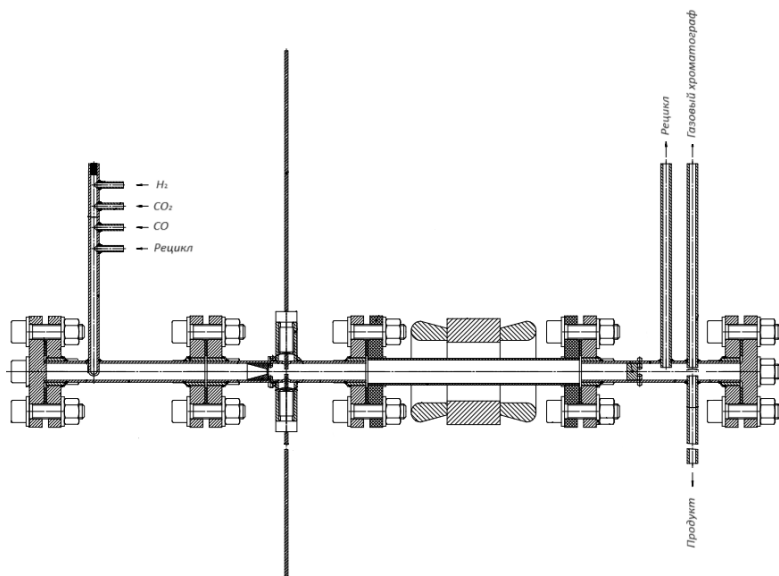
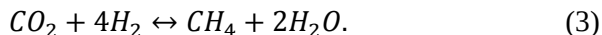
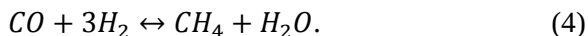


Рис. 1. Чертёж лабораторной установки

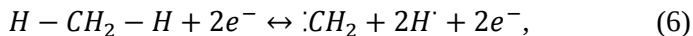
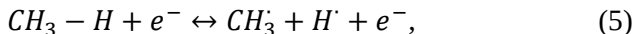
На первом этапе реализуются следующие реакции.



Энергоэффективность рассчитывается по формуле:



На втором этапе протекает эффективная конверсия метана при его фрагментации электронным ударом о полку катализатора, в результате образуются алканы по следующим реакциям:



Автор выражает благодарность научному руководителю, д.т.н. Галкину М.Л. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

1. Asisov A.A., Vakar R.I., Jivotov A.K., et al., Proc. USSR Acad. Sci. 1983, **271**, 94–97.
2. Belov I., Vermeiren V., Paulussen S., Bogaerts A., J. CO<sub>2</sub> Util. 2018, **24**, 386–397.
3. Berthelot A., Bogaerts A., J. Phys. Chem. P. 2017, **121**, 8236–8251.
4. Uytendhouwen Y., Van Alphen S., Michielsen I., et al., Chem. Eng. J. 2018, **348**, 557–568
5. Zhang H., Li L., Li X., et al., J. CO<sub>2</sub> Util. 2018, **27**, 472–479.
6. Лебедев Ю.А., Шахатов В.А., Успехи прикладной физики. 2022, **10**(2), 109–131.
7. Котелев М.С., Гущин П.А., Иванов Е.В. и др., Башкирский химический журнал. 2010, **17**(3), 175–178.

**Математическое моделирование излучения  
плазменной антенны и исследование ее характеристик  
методом поверхностного резонанса  
в тлеющем и высокочастотном разряде**

**Киселев Г.Б., Шемахин А.Ю.**

*Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

*E-mail: [kiselev.gleb.97@gmail.com](mailto:kiselev.gleb.97@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-155-155

Работа включает две основные части. Первая посвящена исследованию длин волн электромагнитных полей, генерируемых плазменной антенной в зависимости от давления. Исследование проводилось путем моделирования в среде Comsol Multiphysics тлеющего разряда вдоль трубки (одномерная постановка). По полученным распределениям тока в плазме были построены диаграмма направленности и пространственное распределение электромагнитного поля (решение уравнений Максвелла в двумерной постановке) [1].

Вторая часть работы посвящена исследованию неинвазивного метода измерения электронной плотности приповерхностного слоя ртутного тлеющего разряда, который основан на определении резонансных частот между самим слоем разряда и частотой источника. Полученные данные были верифицированы с помощью численной модели, построенной в среде Comsol Multiphysics, и эмиссионной спектроскопией [2].

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Желтухину В.С. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Terentev T.N., Kiselev G.B., Shemakhin A.Y., et al., High Energy Chem. 2024, **58**, 190–193.
2. Shemakhin Y.A. et al., Journal of Physics: Conference Series. (IOP Publishing). 2022, **2270**(1), 012007.

## Плазменные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности

**Кончечков Е.М.<sup>1,2</sup>, Бурмистров Д.Е.<sup>1</sup>, Луканин В.И.<sup>1</sup>, Жуков В.И.<sup>1</sup>,  
Моряков И.В.<sup>1</sup>, Конькова А.С.<sup>1</sup>, Гудкова В.В.<sup>1,2</sup>, Борзосексов В.Д.<sup>1,2</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Российский университет дружбы народов, Москва*

*E-mail: [konchekov@fpl.gpi.ru](mailto:konchekov@fpl.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-156-157

Применение плазменных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности открывает дополнительные возможности для решения широкого спектра задач, стоящих перед отраслью, таких как продовольственная безопасность, экологическая устойчивость и повышения урожайности сельскохозяйственных культур [1]. В реальной практике развивается два подхода к обработке биологических объектов: прямая обработка с помощью низкотемпературной плазмы (НТП) и обработка с помощью плазменно-активированной воды или растворов (ПАР) [2]. В первом случае параметры источника НТП устанавливаются в рамках, позволяющих НТП контактировать с поверхностью объекта, не вызывая термических повреждений. Во втором — на биологический объект наносится жидкость, которая благодаря плазменной обработке насыщена активными формами кислорода и азота.

Одно из ключевых направлений использования НТП и ПАР в сельском хозяйстве — обработка посадочного материала. Например, воздействие на семена модулирует всхожесть, скорость прорастания и устойчивость к неблагоприятным условиям. Механизм действия заключается в улучшении проницаемости семенной оболочки, ускорении водопоглощения и активации метаболических процессов. Кроме того, НТП и ПАР используются для защиты растений от фитопатогенов. Обработка поверхности семян, растений и плодов позволяет снизить необходимость применения химических пестицидов.

В пищевой промышленности НТП и ПАР применяется для обеззараживания и консервирования продуктов. Одно из перспективных направлений — деконтаминация поверхности продуктов питания, упаковок и оборудования [3]. Плазма и ПАР

уничтожают широкий спектр микроорганизмов, включая бактерии, вирусы и грибы, обеспечивая высокий уровень гигиены и относительную безопасность продукции. Это особенно актуально для свежих овощей и фруктов, мясных и рыбных продуктов, а также готовых к употреблению блюд, где использование химических дезинфицирующих средств ограничено или нежелательно.

Потенциал применения НТП в сельском хозяйстве и пищевой промышленности значительно превышает текущие масштабы её использования. НТП предоставляет возможность создания новых технологий для улучшения качества и безопасности продукции, повышения урожайности и устойчивости к биотическим и абиотическим стрессам. Внедрение плазменных технологий может способствовать снижению зависимости от химических пестицидов и консервантов, что соответствует современным тенденциям.

В докладе комплексно рассмотрены современные подходы и методы по применению НТП и ПАР в сельском хозяйстве и пищевой промышленности, а также представлены результаты исследований с использованием ряда источников НТП, созданных в ИОФ РАН.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра биофотоники и отдела физики плазмы ИОФ РАН, особенно руководителям научных тематик Гудкову С.В. и Гусейн-заде Н.Г.

Публикация выполнена в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

1. Gudkov S.V., Sarimov R.M., Astashev M.E. et al., Phys. Usp. 2024, **67**, 194.
2. Konchekov E.M., Gusein-zade N., Burmistrov D.E. et al., IJMS. 2023, **24**, 15093.
3. Konchekov E.M., Gudkova V.V., Burmistrov D.E. et al., Biomolecules. 2024, **14**, 181.

**Термодинамическая оценка реакций,  
сопровождающих газофазный рост и травление алмаза  
в смеси водорода, метана и кислорода**

**Крылов Ю.М., Осянин Д.Н., Федорова И.А.**

1- *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

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

E-mail: [payday780400@yandex.ru](mailto:payday780400@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-158-159

Плазмохимический рост алмаза в смеси водорода, метана и кислорода широко применяется в научных исследованиях и на производстве. Методом низкокогерентной интерферометрии [1] экспериментально фиксируется переход от плазмохимического роста алмаза к его травлению при небольшом возрастании концентрации кислорода от 0 % до 3 % в смеси 5 % метана в водороде. Повышение температуры алмазной подложки также меняет равновесие в сторону травления алмаза. Ранее были опубликованы подробные результаты моделирования концентрации в СВЧ плазме различных молекул и радикалов, участвующих в 500 прямых, обратных и побочных реакциях газофазного синтеза алмаза на основе данных о кинетике химических реакций [2]. Метод химической кинетики оказался достаточно сложен и неочевиден при интерпретации экспериментальных результатов для тройной смеси  $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{--O}_2$ . Между тем, в научной литературе данный вопрос не нашёл сколько-нибудь детального рассмотрения с точки зрения такого наглядного фундаментального метода, как химическая термодинамика [3]. В данной работе сообщается о результатах расчёта основных термодинамических функций и констант равновесия для цепочки прямых и обратных химических реакций, отвечающих за рост и травление алмаза в смеси  $\text{H}_2\text{--CH}_4\text{--O}_2$ . В расчёт берутся не только молекулы и радикалы, но также соответствующие катионы и анионы, присутствующие в плазме, а также на границе раздела твёрдой фазы и плазмы. Представлены результаты расчёта констант равновесия реакций методом Чейза [4] при температурах алмазной подложки от 700 °C до 1200 °C и температурная зависимость для констант равновесия упомянутых реакций. Экспериментально наблюдаемое влияние кислорода на ускорение травления алмаза в кислород-

водородной плазме объясняется тем, что изменения энергии Гиббса окислительных реакций ( $C_{\text{алм}} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ ) в системе  $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{--O}_2$  намного больше по модулю, чем восстановительных ( $\text{CH}_4 \rightarrow C_{\text{алм}}$ ) реакций на всех стадиях. В докладе, кроме того, демонстрируются результаты расчёта того, как именно влияет изменение температуры на химические превращения, связанные с ростом или травлением алмаза в тройной смеси  $\text{H}_2\text{--CH}_4\text{--O}_2$ .

Авторы выражают благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Совеку Д.Н., к.ф.-м.н. Ральченко В.Г. за постановку научной задачи и редактирование доклада и д.ф.-м.н. Юрову В.Ю. за помощь в измерениях и обсуждение результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-42-00120.

1. Yurov V. et al., Physical Chemistry Chemical Physics. 2023, **25**(39), 26623–26631.
2. Ashfold M.N.R., Mankelevich Y.A., Diamond and Related Materials. 2023, **137**, 110097.
3. Крылов Ю.М., Совеку Д.М., Ральченко В.Г. X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ 2024», с. 200.
4. Chase M.W., Jr. // NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition. J. Phys. Chem. Ref. Data. Monograph 9. 1998. 1-1951.



## Термодинамика травления алмаза на воздухе без участия плазмы и с образованием плазмы

Осянин Д.Н.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва  
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

*E-mail: [danilka0580@mail.ru](mailto:danilka0580@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-160-161

При температурах выше  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  в воздушной атмосфере на поверхности алмаза начинает происходить необратимый процесс травления с образованием диоксида углерода. Такое травление имеет место и в кислородной плазме, в том числе лазерной (или воздушной), которая образуется, например, при лазерном облучении алмаза на воздухе. Считается, что немалую роль при лазерной абляции играют фотохимические реакции [1]. Тем не менее, при повышении температуры кристалла нельзя исключать и процессы химического травления в воздушной плазме. Чтобы оценить степень их влияния на абляцию, в данной работе приведены результаты расчёта химических реакций на границе алмаза и воздушной плазмы, инициализированной лазерным воздействием. До сих пор в научной литературе данный вопрос не нашёл детального рассмотрения с точки зрения такого наглядного метода анализа реакций как химическая термодинамика. В классической работе Питера Бахмана [2] лишь упоминается, что травление алмаза в кислородной плазме происходит существенно быстрее, чем в водородной, без пояснения того, как на травление алмаза влияет его температура. В данной работе представлены результаты расчёта методом Чейза [3] термодинамических функций: химического потенциала или энергии Гиббса, энтропии, энтальпии и констант равновесия реакций травления алмаза в смеси  $\text{N}_2\text{-O}_2\text{-H}_2\text{O}$ , протекающих при температурах от  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Реагентами и продуктами данных реакций являются:  $\text{C}_{\text{алм}}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ , а также радикалы  $[\text{H}]$ ,  $[\text{O}]$ ,  $[\text{OH}]$  и др. Энтальпия, энтропия и энергия Гиббса были теоретически рассчитаны на основе общедоступной базы данных Национального института стандартов и технологий США [3]. В докладе приведены температурные зависимости констант равновесия данных реакций с шагом  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На основе разности

химических потенциалов реакций сопоставлены процессы химического травления алмаза на воздухе без образования плазмы (с участием молекулярного кислорода, воды и азота) и с образованием плазмы (с участием радикалов O, OH, N).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-12-00137.

1. Yingling Y.G., Zhigilei L.V., Garrison B.J., Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2001, **145**(3), 173–181.
2. Prijaya N.A., Angus J.C., Bachmann P.K., Diamond and Related Materials. 1994, **3**(1-2), 129–136.
3. Chase M.W., Jr. NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition. J. Phys. Chem. Ref. Data. Monograph 9. 1998. 1–1951.

## Измерения концентрации плазмы в газоразрядной трубке плазменной антенны

**Степин В.П.<sup>1</sup>, Богачев Н.Н.<sup>1</sup>, Жуков В.И.<sup>1</sup>, Андреев С.Е.<sup>1</sup>,  
Усачёнок М.С.<sup>2</sup>**

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

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

E-mail: [vjacheslav-stepin@rambler.ru](mailto:vjacheslav-stepin@rambler.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-162-164

Плазменные антенны, изучаемые в настоящее время, представляют собой антенны с токоведущими или управляющими элементами из плазмы газового разряда или полупроводниковой плазмы. Такие антенны имеют ряд преимуществ перед антеннами с металлическими элементами: возможность электронного управления характеристиками, меньшая радиолокационная заметность и др. Управление характеристиками антенны осуществляется изменением либо концентрации плазмы, либо пространственной конфигурации (наличие плазмы, длина, радиус и др.) [1–5]

Для управления характеристиками антенны необходимо контролировать концентрацию плазмы. Многие известные методы измерения концентрации плазмы (зонд Ленгмюра, оптическая спектроскопия и т.д.) не подходят для измерения концентрации плазмы в антенне в связи с особенностями её конструкции.

СВЧ резонатор является одним из основных средств диагностики газоразрядной плазмы, служащий для определения концентрации электронов и частоты столкновений электронов. Концентрация электронов определяется по смещению резонансной кривой резонатора, а частота столкновений — по изменению его добротности. Исследуемая газоразрядная плазма антенны, заключенная в стеклянную трубку, размещается на оси волновода. В общем виде формула, связывающая среднюю объемную концентрацию электронов в бесстолкновительной плазме и смещение резонансной кривой резонатора, следующая [6]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = - C_V \frac{V_{пл}}{V_{рез}} * \frac{\langle n_e \rangle}{2n_{кр}}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — резонансная частота;  $\langle n_e \rangle$  — средняя объемная плотность электронов;  $C_V$  — коэффициент формы, определяющий связь между величинами, измеряемыми при зондировании плазмы, и концентрацией электронов.

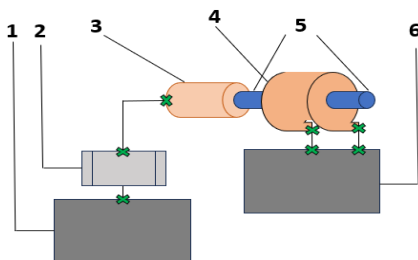


Рис. 1. Схема измерительного стенда концентрации плазмы в плазменной антенне:

- 1 — радиостанция Vertex VX-2100; 2 — аттенуатор 3 дБ,
- 3 — коаксиальное согласующее устройство; 4 — резонатор;
- 5 — плазменная антенна; 6 — векторный анализатор цепей Keysight N9912A.

Измерения с использованием СВЧ резонатора проводились на стенде, схема которого представлена на рис. 1. В цилиндрический резонатор (диаметром 90 и высотой 30 мм) помещалась исследуемая плазма в газоразрядной люминесцентной лампе плазменной антенны, выполненной в виде прямой стеклянной трубки диаметром 12 и длиной 20 мм. Также в рабочем стенде был задействован аттенуатор на 3 дБ, подключенный к FM радиостанции Vertex 2100 с выходной мощностью до 50 Вт и рабочей частотой в 444 МГц. Измерения на стенде проводились следующим образом: сигнал от передающей радиостанции VX-2100 поступал напрямую (либо через аттенуатор) на исследуемую антенну через коаксиальное согласующее устройство, после этого в газоразрядной трубке антенны создавалась плазма и излучался сигнал. Одновременно с этим через цилиндрический резонатор проходил сигнал векторного анализатора цепей Keysight N9912A и измерялись спектры S11 и S21. По спектру S21 определялось смещение резонанса по частоте в диапазоне частот 3,3 Гц – 3,9 ГГц, которое использовалось для вычисления средней по

радиусу концентрации плазмы в газоразрядной трубке плазменной антенны.

Результаты измерений распределения концентрации плазмы по длине плазменной антенны представлены на рис. 2. Из графика видно почти линейное снижение концентрации при удалении от точки ввода излучения передатчика. Уменьшение на 3 дБ мощности, подводимой к антенне, за счёт использования аттенюатора в среднем снижает концентрацию плазмы в плазменной антенне в 1,5–2 раза.

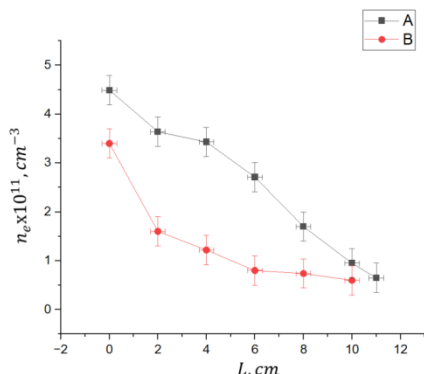


Рис. 2. График зависимости распределения концентрации плазмы по длине газоразрядной трубки плазменной антенны без аттенюатора (A) и с аттенюатором 3 дБ (B).

Авторы выражают благодарность д.т.н., доценту Замуруеву С.Н., к.ф.-м.н. Карфидову Д.М., к.ф.-м.н. Сергейчеву К.Ф. за помощь в организации и проведении экспериментальных измерений.

1. Borg G.G., Harris J.H., Martin N.M., et al., Physics of Plasmas. 2000, **75**, 2198–2202.
2. Rayner J.P., Whichello A.P., Cheetham A.D. IEEE Trans. on plasma science. 2004, **32**(1), 269–281.
3. Ye H.Q., Gao M., Tang C.J. IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2011, **59**(5), 1497–1502.
4. Anderson T. Plasma antennas. Artech House, 2020, 352 p.
5. Sadeghikia F., Noghani M. T., Simard M.R. AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2016, **70**(5), 652–656.
6. В.Е. Голант Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы, М., «Наука», 1968, 327 с.

**Моделирование движения частиц  
в токовом слое лабораторной установки ТС-3DM  
с различными конфигурациями магнитных полей**

**Фомичев О.В., Андреев С.Е., Нугаев И.Р., Харлачев Д.Е.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [fomichevov@mail.ru](mailto:fomichevov@mail.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-165-166

Астрофизические явления, которые вызывают солнечные вспышки и суббури в магнитосфере земли, вызываются процессами перезамыкания магнитных силовых линий и эволюцией токовых слоев и могут оказывать заметное влияние на работоспособность электронного оборудования [1]. Изучение эволюции токовых слоев проводится в лаборатории отдела физики плазмы на установке, воспроизводящей подобные явления [2, 3]. Ранее проведенные серии экспериментов позволили с использованием различных магнитных конфигураций изучить отдельные процессы формирования и эволюции плазменных токовых слоев [4, 5]. Проведение последующих исследований даст возможность лучше изучить структуру процессов, происходящих в токовых слоях.

В настоящее время в ИОФ РАН создана модернизированная установка токового слоя ТС-3DM [6]. Для этой установки были смоделированы двухмерные и трехмерные конфигурации магнитных полей, а также были получены траектории движения отдельных электронов для данных конфигураций внутри и вне токового слоя. Для задания токового слоя была использована модель Друде с плотностью плазмы  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  [7]. Для различных энергий электронов, испускаемых катодом, продемонстрирован как их дрейф на стенку камеры, так и захват в токовом слое. В токовом слое остаются электроны с энергией порядка 10 эВ, что соответствует результатам измерений электронной температуры, полученной на установке ТС-3D.

1. Зелёный Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В., Физика плазмы. 2011, **37**, 137–182.
2. Кадомцев Б.Б., Успехи физ. наук. 1987, **151**, 23–29.
3. Сыроватский С.И., Франк А.Г., Ходжаев А.З., Письма в ЖЭТФ. 1972, **15**, 138–142.

4. Syrovatskii S.I., *Annu. Rev. Astron. Astro-phys.* 1981, **19**, 163–227.
5. Франк А.Г., *Успехи физ. наук.* 2010, **180**, 982–988.
6. Харлачев Д.Е., Нугаев И.Р., Тезисы 1 всероссийской научной школы национального центра физики и математики для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по экспериментальной лабораторной астрофизики и геофизики, 2023, **1**, 96–98.
7. Франк А.Г., Кирий Н.П., Иванов В.А. и др., *ФИЗМАТ.* 2023, **1(2)**, 88–104.

## ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

### Разработка адаптивного биосенсора с молекулярно-регулируемой плотностью центров связывания на сенсорной поверхности для обнаружения низкомолекулярных соединений

**Беляков Н.А., Орлов А.В.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [WhiteNik.bel@yandex.ru](mailto:WhiteNik.bel@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-167-168

С развитием биотехнологий появилась возможность определять качественный и количественный состав биологических сред с помощью биосенсоров. Важными параметрами таких систем являются динамический диапазон и разрешающая способность. Однако, большая разрешающая способность системы приводит к снижению динамического диапазона и наоборот, поэтому при разработке биосенсорной системы приходится искать компромисс между обозначенными параметрами.

Эта проблема может быть решена созданием биоаналитической системы с настраиваемым динамическим диапазоном под условия конкретных измерений. В данной работе мы предлагаем метод управления количеством доступных центров связывания биораспознающих антител с помощью «экранирующих» молекул. Управление чувствительной поверхностью биосенсора позволяет изменять динамический диапазон и разрешающую способность системы.

Регистрация межмолекулярных взаимодействий в проводимых экспериментах происходила с помощью устройства, работающего на основе спектрально-корреляционной интерферометрии (СКИ) – СКИ-хемосенсора [1–3]. Этот прибор позволяет в режиме реального времени наблюдать биохимические реакции на поверхности покровного стекла. В качестве источника излучения был использован суперлюминесцентный диод. Широкополосное излучение ( $850 \pm 15$  нм) диода проходило через сканирующий интерферометр Фабри-Перо и попадало на поверхность покровного стекла. В данном случае стекло выступало в роли второго интерферометра и сенсорного чипа одновременно. Отраженное от стекла излучение



попадало на матрицу 12-битной ПЗС камеры. Изменение толщины биослоя на поверхности стекла приводит к сдвигу фазы сигнала, регистрируемого камерой. Благодаря изменению фазы математически вычисляется соответствующее изменение толщины биослоя [4, 5].

В качестве модельных «экранирующих» молекул были выбраны молекулы фолиевой кислоты, в качестве модельного определяемого вещества использовали антибиотик хлорамфеникол, а молекулы биотина использовали для усиления сигнала. Благодаря стерическим особенностям конъюгатов указанных молекул с бычьим сывороточным альбумином на сенсорной поверхности были реализованы две отличающиеся конфигурации.

В первой конфигурации чувствительной поверхности биосенсора количество центров связывания антител к хлорамфениколу уменьшалось за счет стерического экранирования антителами к фолиевой кислоте, в результате чего динамический диапазон смещался в сторону сверхнизких концентраций. Во второй конфигурации экранирование не проводилось. Определение модельных молекул проводили в стандартном конкурентном формате с антителами в растворе и антигеном на сенсорной поверхности.

Продемонстрированный новый подход к созданию адаптивного биосенсора, способного подстраивать чувствительную поверхность для определения низкомолекулярных соединений, позволил разработать тест-систему с рекордным пределом обнаружения антибиотика хлорамфеникола — 200 фг/мл, охватывающую 10 порядков величины концентраций. Экспериментально показана возможность настройки поверхности биосенсора, что позволяет создавать биосенсорные системы с управляемыми аналитическими характеристиками, решающие проблему баланса между динамическим диапазоном и разрешающей способностью.

Авторы выражают благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Никитину П.И. и коллективу лаборатории «Биофотоника» ЦЕНИ ИОФ РАН, в частности Знойко С.Л.

1. Orlov A.V., et al., Biosensors and Bioelectronics, 2020, **159**, 112187
2. Orlov A.V., et al., Food Chemistry, 2022, **383**, 132427
3. Novichikhin D.O., et al., Chemosensors 2023, **11**(1), 17
4. Burenin A.G., et al., Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2015, **407**, 3955–3964
5. Nikitin P.I., et al., Quantum Electron., 2000, **30**, 1099

**Анализ каротиноидов  
в сложных многокомпонентных системах и смесях  
методом спектроскопии комбинационного рассеяния света**

**Васимов Д.Д.<sup>1</sup>, Ашихмин А.А.<sup>2</sup>, Новиков В.С.<sup>1</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Пуцинский научный центр биологических исследований*

*Российской академии наук, Пуцино*

*E-mail: [vasdim1612@yandex.ru](mailto:vasdim1612@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-169-171

Природные органические пигменты каротиноиды выполняют множество ключевых функций для разнообразных живых организмов. Каротиноиды являются компонентами систем сбора и преобразования света в растениях и бактериях и защищают их от фотоокислительного повреждения. В организме человека они выступают в роли провитаминов, геропротекторов, антиоксидантов и иммуностимуляторов. Люди не вырабатывают каротиноиды самостоятельно, а получают их из продуктов питания и биологически активных добавок. Свойства каротиноидов сильно зависят от их химического и изомерного состава, поэтому его особенно важно определять в сложных многокомпонентных системах и смесях каротиноидов: в биологических тканях, в пищевых и лекарственных источниках каротиноидов для человека.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света — высокоинформативный и неразрушающий метод анализа молекулярных веществ. Резонансное усиление интенсивности линий КР каротиноидов позволяет детектировать их даже при малых концентрациях в составе многокомпонентных систем и смесей.

В данной работе экспериментально исследованы спектры КР ряда чистых каротиноидов, смеси каротиноидов и содержащего каротиноиды светособирающего комплекса LH2 из пурпурной серной бактерии *Ectothiorhodospira haloalkaliphila*. Образцы каротиноидов были выделены методом высокоэффективной жидкостной хроматографии из пурпурных бактерий и биологически активных добавок. Спектры КР были зарегистрированы при возбуждении излучением с длиной волны 532 или 785 нм на КР-микроскопе Senterra II (Brucker, США) со спектральным разрешением  $1,5 \text{ см}^{-1}$ .

Для отнесения линий КР к определенным колебаниям и для определения зависимости спектров КР от химического и изомерного состава каротиноидов методом функционала плотности были рассчитаны структуры и спектры КР *транс*- и моно-*цис*-изомеров молекул каротиноидов с длиной сопряжения от 3 до 13 C=C связей.

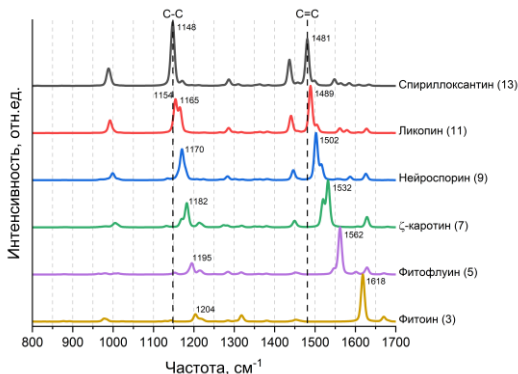


Рис. 1. Рассчитанные спектры КР *транс*-изомеров молекул спириллоксантина, ликопина, нейроспорина, ζ-каротина, фитофлуина и фитоина. В скобках для каждого каротиноида указана длина сопряжения.

Сравнительный анализ рассчитанных спектров КР исследуемых каротиноидов (рис. 1) показал, что увеличение длины сопряжения приводит к сдвигу в низкочастотную область линий, соответствующих валентным колебаниям C–C и C=C связей. Установлено, что чем больше длина сопряжения, тем меньше величина сдвига названных линий, причём зависимость нелинейная. Показано, что с увеличением длины сопряжения возрастает интенсивность линии, соответствующей валентным колебаниям C–C связей. Все эти закономерности были подтверждены при сравнении с экспериментальными спектрами КР каротиноидов.

Возможности спектроскопии КР для определения химического состава каротиноидов продемонстрированы на примере смеси каротиноидов и светособирающего комплекса LH2 (рис. 2). В спектре КР смеси каротиноидов наблюдались не только линии, соответствующие спектру фитоина, как это ожидалось, исходя из условий выделений, но и дополнительные линии, совпадающие в пределах спектрального разрешения с линиями КР ликопина. Таким образом, в данной смеси ликопин содержится в виде примеси.

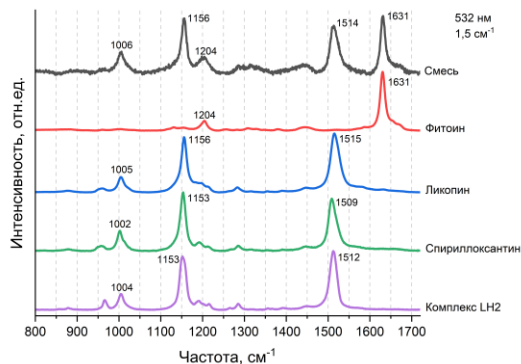


Рис. 2. Экспериментальные спектры КР смеси каротиноидов, фитоина, ликопина, спириллоксантина, комплекса LH2.

Для определения состава каротиноидов в комплексе LH2 в спектрах был проведен анализ контура линий валентных колебаний C–C и C=C связей, а также положений и интенсивностей менее интенсивных линий. В частности, было обнаружено, что в полосу около  $1153\text{ см}^{-1}$  дают вклад две линии. Поскольку в спектре не обнаружено дополнительных линий, соответствующих *цис*-изомерам каротиноидов, сделан вывод, что эти линии относятся к *транс*-изомерам двух различных каротиноидов. Частоты этих линий соответствуют линиям КР ликопина и спириллоксантина, на основании чего сделан вывод, что комплекс LH2 содержит именно их. Дополнительным подтверждением этого результата является присутствие в спектре комплекса LH2 линий около  $1630$  и  $1670\text{ см}^{-1}$ , первая из которых наблюдается в спектре ликопина и отсутствует в спектре спириллоксантина, а вторая — наоборот.

Таким образом, в работе показано, что совместный анализ положений и интенсивностей не только основных, но и менее интенсивных линий в спектрах КР каротиноидов с привлечением результатов квантово-химических расчетов позволяет идентифицировать каротиноиды и их изомеры как в чистом виде, так и в смесях и биологических объектах.

Авторы выражают благодарность Межведомственному суперкомпьютерному центру Российской академии наук за предоставленные вычислительные ресурсы.

## **Идентификация активного центра первичной структуры бычьего коллагена I типа с помощью AutoDock 4**

**Иванькова Ю.И.**

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

*E-mail: [i@ivajull.ru](mailto:i@ivajull.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-172-174

Коллаген I типа является одним из наиболее распространённых типов белка. Он содержится в коже, костях, сухожилиях, роговице и соединительных тканях человека. Коллаген представляет собой структуру тройной спирали с повторяющимися триплетными единицами Gly-X-Y [1].

Коллаген широко применяют в биомедицине: для доставки лекарств, замещения стекловидного тела, покрытия протезов, восстановления костной ткани, в качестве шовного материала. Идеальная повязка для ран должна обладать преимуществами гидрофильности, антибактериальной активности, водопоглощающей способности, контролируемых механических свойств, биосовместимости и воздухопроницаемости.

Коллаген обладает превосходными гемостатическими свойствами, низкой иммуногенностью, биоразлагаемостью и способностью стимулировать деление клеток. Однако традиционная коллагеновая мембрана имеет много недостатков, таких как плохие механические свойства, плохая термическая стабильность, быстрая деградация и т.д., что ограничивает ее более широкое применение в этих областях [2].

Одним из способов устранения указанных дефектов является комбинирование коллагена с биоразлагаемыми синтетическими полимерами, например, полилактид (PLA), поликапролактон (PCL), полиуретан (PU) и др. Они имеют контролируемую скорость деградации, хорошую работоспособность, превосходные механические свойства, нетоксичные побочные эффекты. Положительный эффект взаимодействия биополимеров с коллагеном упоминается во многих статьях, например, в [3–5].

Главной задачей работы является выявление активного центра тройной спирали коллагена I типа при взаимодействии с

антибиотиками в шовном материале на основе поликапролактона. В качестве антибактериальной добавки мы изучили тетрациклин и бацитрацин. На выбор антибактериальной добавки повлиял тот факт, что данные лекарственные средства являются наиболее часто используемыми антибиотиками широкого спектра действия.

В качестве коллагена нами был выбран бычий коллаген I типа, как наиболее упоминаемый в подобных исследованиях [2, 6–7]. Структура COL1A1 P02453 была взята из открытого банка данных AlphaFold Protein structure DataBase [8]. Тройную спираль выбранного бычьего коллагена I типа получили с помощью веб-сервиса AlphaFold server [9] от компании DeepMind. Результаты моделирования тройной спирали представлены на рис. 1.

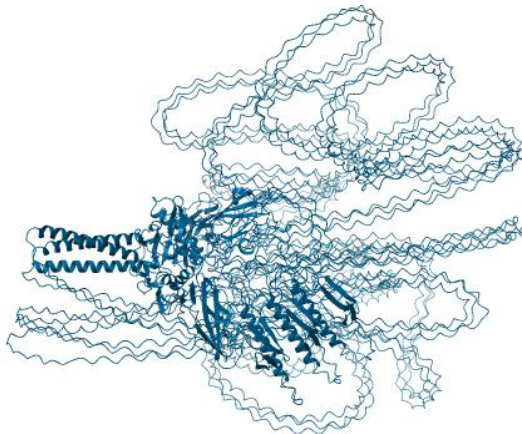


Рис. 1. Тройная спираль бычьего коллагена I типа, полученная с помощью веб-сервиса AlphaFold server.

С помощью пакета AutoDock 4 [10] был проведен молекулярный докинг, где в качестве макромолекулы была выбрана тройная спираль бычьего коллагена I типа, а лигандами выступали выбранные антибиотики. Были обнаружены активные центры и сайты связывания. Дана характеристика взаимодействиям.

Автор выражает благодарность научным руководителям, к.ф.-м.н. Сорокиной Л.Ю. и д.ф.-м.н. Сорокину П.Б. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы

повышения конкурентоспособности НИТУ МИСИС (проект № К6-2022-041). Расчеты проводились на суперкомпьютерном кластере, предоставленном лабораторией «Моделирования и разработки новых материалов» НИТУ МИСИС, и межведомственным суперкомпьютерном центре Российской академии наук.

1. Holmes D.F., et al., Current topics in developmental biology. 2018, **130**, 107–142.
2. Bhovi V.K., Melinmath S. P., Gowda R. Mini Reviews in Medicinal Chemistry. 2022, **22**(16), 2081–2101.
3. Kotcharat P. et al. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2021, **20**, 100404.
4. Herrero-Herrero M. et al. Polymer Testing. 2021, **103**, 107364.
5. Zhao L. et al. Materials Science and Engineering: C. 2021, **118**, 111441.
6. Chandika P. et al. Materials Science and Engineering: C. 2021, **121**, 111871.
7. Safari B. et al. European Polymer Journal. 2022, **171**, 111220.
8. <https://alphafold.ebi.ac.uk/entry/P02453>
9. <https://alphafoldserver.com/>
10. <https://autodock.scripps.edu/>

## **Влияние комплексов наночастиц селена и наночастиц цинка на урожайность сельскохозяйственных культур**

**Казанцева Д.В., Пасхин М.О., Шумейко С.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [dinacazantsewa@yandex.ru](mailto:dinacazantsewa@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-175-177

Использование наночастиц (НЧ), имеющих в своем составе компоненты минерального питания растений, позволяет уменьшить количество химических удобрений, используемых при их выращивании. Использование наноудобрений позволяет избежать токсического эффекта за счёт постепенного высвобождения питательных элементов в доступной растениями форме. Цинк и селен, в том числе наноразмерные, способствуют увеличению продуктивности сельскохозяйственных растений интенсифицируя процесс фотосинтеза и, как следствие, накопление биомассы.

В данной работе рассмотрено совместное использование НЧ селена и НЧ цинка (в виде оксида) в качестве компонентов удобрений при выращивании растений томата (*Solanum lycopersicum*). Растения были разделены на 6 групп, различающихся по типу используемых питательных растворов. В контрольной группе полив осуществляли питательным раствором (раствор 1), состав которого приведён в таблице. Экспериментальные растения поливали раствором, содержащим НЧ селена, НЧ цинка или НЧ селена и НЧ цинка, добавленные одновременно, как в присутствии, так и в отсутствии растворимого цинка в питательном растворе.

Для подбора подходящей концентрации НЧ для приготовления питательных растворов руководствовались литературными данными. Оптимальное соотношение НЧ селена и НЧ цинка определяли как по их взаимодействию в водном растворе, так и при выращивании растений.

Методами динамического светорассеяния и просвечивающей электронной микроскопии показано, что НЧ цинка в водном растворе имели размер, равный 20–40 нм, собранные в агрегаты, размером 579 нм, при этом инкубация НЧ в растворе приводила к быстрому образованию агрегатов, размером до 5314 нм. Добавление НЧ селена к НЧ цинка не приводило к изменениям размера агрегатов в водном



растворе, но при этом препятствовало образованию агрегатов во время инкубации, которые в течение 5–7 минут достигали около 1200 нм и оставались стабильными. При этом оптимальное соотношение НЧ цинка к НЧ селена по количеству частиц в объёме составляло от 1:1 до 1:10. Таким образом, НЧ селена могут увеличить доступность цинка из наночастиц Zn для растений из почвы.

Таблица 1. Состав питательного раствора (раствор 1)  
для полива контрольной группы растений

| Соединения      |                                                      | Содержание, г/л |
|-----------------|------------------------------------------------------|-----------------|
| В форме солей   | $\text{KNO}_3$                                       | 0,05            |
|                 | $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 0,17            |
|                 | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 1,06            |
|                 | $\text{K}_2\text{SO}_4$                              | 0,38            |
|                 | $\text{KH}_2\text{PO}_4$                             | 0,135           |
|                 | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$            | 0,49            |
|                 | $\text{Na}_2\text{MoO}_4$                            | 0,0001          |
|                 | $\text{H}_3\text{BO}_3$                              | 0,002           |
| В форме хелатов | меди (II)                                            | 0,0045          |
|                 | железа (II)                                          | 0,18            |
|                 | марганца (II)                                        | 0,075           |
|                 | цинка                                                | 0,03            |

Это предположение было проверено экспериментально. Показано, что совместное добавление НЧ цинка и НЧ селена в питательный раствор приводило к уменьшению вымывания НЧ селена из почвы и повышению доступности исследуемых элементов для растений томата, за счёт чего увеличивалась их продуктивность.

Авторы выражают благодарность научному руководителю к.б.н. Яныкину Д.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждении результатов.

1. Serov D.A. et al. Materials. 2023, **16**, 15, 5363.
2. Yang L. et al. Plant Physiology and Biochemistry. 2024, 108895.

## Анализ структуры полиэтиленгликолей методом спектроскопии комбинационного рассеяния света

**Козлова Л.Ю.<sup>1</sup>, Любимовский С.О.<sup>1</sup>, Седуш Н.Г.<sup>2,3</sup>, Новиков В.С.<sup>1</sup>**

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

2- Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова  
Российской академии наук, Москва

3- Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

E-mail: [lus.kozlowa2011@kapella.gpi.ru](mailto:lus.kozlowa2011@kapella.gpi.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-178-180

Полиэтиленгликоли (ПЭГ,  $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{H}$ ) и метоксиполиэтиленгликоли (мПЭГ,  $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{CH}_3$ ) широко используются в многих областях, в том числе в медицине и фармацевтике, например, при производстве пегилированных лекарственных препаратов и мазей. Одним из наиболее перспективных применений этих соединений является их использование в качестве макроинициаторов в реакции полимеризации лактида с раскрытием цикла для получения амфифильных сополимеров полилактид-блок-ПЭГ. мПЭГ применяется для синтеза двойных сополимеров, ПЭГ – для синтеза тройных блок-сополимеров. Такие сополимеры используются для создания наночастиц-носителей, используемых в наносомальных системах адресной доставки лекарств с заданным профилем высвобождения активного компонента, и для создания тканеинженерных конструкций в регенеративной медицине.

Разработка таких сложных медицинских систем со строго определенными свойствами требует использования эффективных неразрушающих методов анализа структуры, в том числе содержания, конформационного и фазового состава ПЭГ в составе блок-сополимеров и в готовых медицинских изделиях. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света в сочетании с квантово-химическими расчетами структуры и спектров КР является перспективным методом для решения этой задачи. Целью данной работы была разработка методик количественного анализа структуры ПЭГ и мПЭГ с различной молекулярной массой (ММ) с помощью спектроскопии КР.

Спектры КР ПЭГ и мПЭГ были зарегистрированы с использованием КР микроскопа Senterra II (Bruker, США) со

спектральным разрешением 1,5 и 4  $\text{см}^{-1}$ . Были исследованы спектры КР при возбуждении излучением с длиной волны 532 и 785 нм. Расчеты структуры и спектров КР олигомеров этиленгликоля (ОЭГ) с различным числом мономерных звеньев были проведены с использованием некоммерческой программы «ПРИРОДА» в приближении OLYP/4z. Для сравнения экспериментальных и теоретических спектров рассчитанные линии уширяли с учетом формы и ширины линий, определенных из экспериментальных спектров КР.

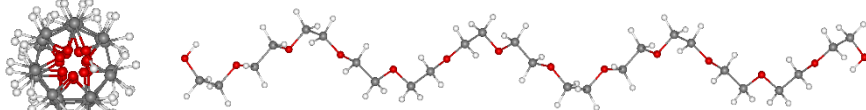


Рис. 1. Оптимизированная структура ОЭГ в конформации спирали 7/2 с 13 мономерными звеньями в двух проекциях.

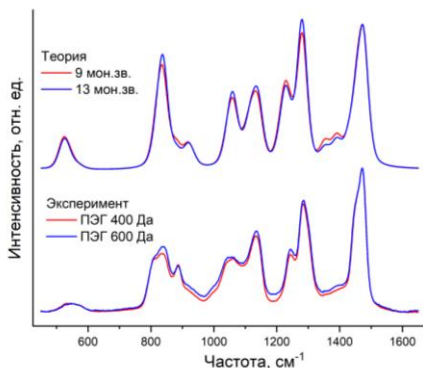


Рис. 2. Рассчитанные спектры КР ОЭГ в конформации спирали 7/2 с 9 и 13 мономерными звеньями и экспериментальные спектры КР ПЭГ со средней ММ, равной 400 и 600 Да\* в диапазоне 450–1650  $\text{см}^{-1}$ .

\* Дальтён или атомная единица массы, внесистемная единица массы, равная  $1/12$  массы свободного покоящегося атома углерода  $^{12}\text{C}$ , находящегося в основном состоянии

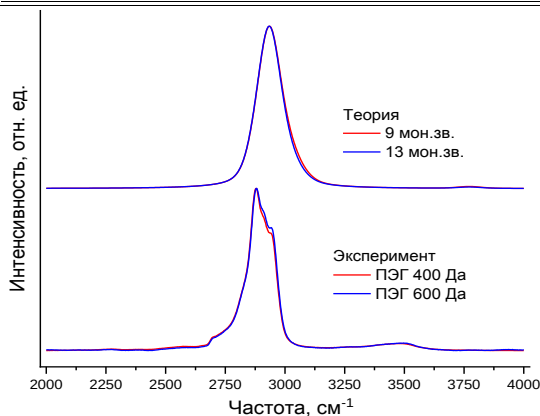


Рис. 3. Рассчитанные спектры КР ОЭГ в конформации спирали 7/2 с 9 и 13 мономерными звеньями ПЭГ и экспериментальные спектры КР ПЭГ со средней ММ, равной 400 и 600 Да в диапазоне 2000–4000  $\text{см}^{-1}$ .

Из рис. 2 и 3 видно, что выбранное приближение OLYP/4z достаточно хорошо описывает экспериментальные спектры КР ПЭГ. Показано, что наиболее сильно от ММ зависит частота и относительная интенсивность линии КР ПЭГ около 830  $\text{см}^{-1}$ . Спектры КР ПЭГ отличаются от спектров мПЭГ положением и более высокой интенсивностью линий около 885 и 1056  $\text{см}^{-1}$ . Линия около 830  $\text{см}^{-1}$  отвечает симметричным, а линия около 885  $\text{см}^{-1}$  — асимметричным валентным колебаниям С–С- и С–О-связей. Линия около 1056  $\text{см}^{-1}$  соответствует смешанным колебаниям, вклад в которые дают валентные колебания С–С- и С–О-связей и деформационные колебания связей комплекса атомов С–С–О.

Таким образом, в работе показано, что спектроскопия КР является эффективным инструментом анализа структуры ПЭГ и мПЭГ.

## Восстановление оптических свойств тканей желудочно-кишечного тракта путем обработки спектральных данных

**Кривецкая А.А.<sup>1,2</sup>, Кустов Д.М.<sup>1</sup>, Романишкин И.Д.<sup>1</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Инженерно-физический институт биомедицины*

*Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Москва*

*E-mail: [annakrivetskaya1998@gmail.com](mailto:annakrivetskaya1998@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-181-182

Определение оптических свойств биологических тканей является важной задачей. Полученные данные можно использовать как в практических целях в клинических условиях, например, при планировании фотодинамической терапии, так и для моделирования распространения оптического излучения в стенках различных органов. В настоящее время, согласно общедоступным литературным данным, информация об оптических свойствах известна для таких тканей желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) человека, как пищевод (без разделения на слои) [1], слизистая желудка [2], слизистый, подслизистый [3] и мышечный слои [4], а также вся стенка толстой кишки [5, 6]. Однако имеющиеся данные не систематизированы, отсутствуют сведения о каждом из слоёв стенок органов ЖКТ, полученных одновременно, в то время как данная информация может быть полезна при сопоставлении оптических свойств тканей различного типа. Целью данной работы является определение значений коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния слизисто-подслизистого и мышечно-серозного слоев желудка и тонкой кишки.

Восстановление оптических свойств было осуществлено посредством регистрации спектров диффузного отражения и пропускания при помощи спектрофотометра с интегрирующей сферой Hitachi U-3400 и их последующей обработки при помощи алгоритма на основе обратного метода добавления-удвоения, реализованного при помощи языка программирования Python. Исследуемые объекты представляли собой образцы тканей желудка и тонкой кишки человека, отсеченные от резецированных органов пациентов после хирургических операций, проводимых на базе Университетской Клинической больницы №1 Первого МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России.

В результате проведенной работы получены значения коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния в спектральном диапазоне 400–650 нм для исследуемых образцов. Форма зависимости коэффициента поглощения совпадает с ожидаемой в соответствии со свойствами гемоглобина, присутствующего в тканях. Также при сопоставлении полученных в данной работе значений оптических свойств с литературными данными установлено, что исследуемые характеристики совпадают по порядку величины и находятся в диапазоне 0–10  $\text{мм}^{-1}$ .

По полученным значениям коэффициента поглощения и редуцированного коэффициента рассеяния для слизисто-подслизистого и мышечно-серозного слоёв желудка и тонкой кишки человека можно сделать вывод, что разработанный алгоритм может применяться для восстановления оптических свойств биологических тканей.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Савельевой Т.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов и д.м.н. Лёвкину В.В. за предоставление образцов биологических тканей и их разделение на слои.

1. Sweer J.A., Chen M.T., Salimian K.J. et al., J. Biophotonics. 2019, **12**(9). e201900005(12p).
2. Bashkatov A., Genina E., Kochubey V. et al., Medical Laser Application. 2007, **22**, 95–104.
3. Bashkatov A., Genina E., Kochubey V. et al., Quantum Electronics. 2014, **44**(8), 779–784.
4. Carneiro I., Carvalho S., Henrique R. et al., IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018, **25**(1), 1.
5. Marchesini R., Pignoli E., Tomatis S. et al., Lasers Surg. Med. 1994, **15**(4), 351–357.
6. LaRiviere B., Ferguson N.L., Garman K.S. et al., Biomed. Opt. Express. 2019, **10**(11), 5703–5715.

**Возможности спектроскопии КР  
при анализе биологически активных добавок,  
содержащих омега-3 жирные кислоты**

**Кузнецов С.М., Лаптинская П.К., Новиков В.С.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [kuznetsovsm@kapella.gpi.ru](mailto:kuznetsovsm@kapella.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-183-184

В работе были исследованы биологически активные добавки (БАД) на основе омега-3 жирных кислот. Такие кислоты являются жизненно важными для организма человека, они способствуют поддержанию здоровья сердечно-сосудистой системы и нормального уровня холестерина в крови. Омега-3 кислоты не вырабатываются организмом человека, а поступают только с пищей или БАД. Природными источниками таких кислот являются льняное масло и жиры некоторых пород рыб.

Омега-3 жирные кислоты обладают низкой окислительной стабильностью и могут деградировать, особенно при повышенных температурах или под воздействием ультрафиолетового излучения. В этом случае БАД не только теряют свои полезные свойства, но и становятся вредными для человека из-за токсичности ряда продуктов окисления компонентов БАД. Помимо этого, БАД, содержащие омега-3 жирные кислоты, являются дорогостоящими и зачастую подвергаются фальсификации. В связи с этим необходимо строго контролировать состав, качество и подлинность БАД.

В качестве метода исследования в работе выбран метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), который позволяет с высокой точностью определять составы БАД без нарушения лекарственной формы (в том числе, возможность анализа сквозь желатиновую капсулу), обеспечивает высокую скорость анализа и не требует подготовки образцов.

В работе были зарегистрированы спектры КР большого набора БАД, отличающихся производителями, дозировками и формой омега-3 кислот, а также составом исходного сырья. На рис. 1 для примера представлены спектры КР БАД, содержащих омега-3 кислоты в трёх наиболее часто встречающихся формах: триглицеридной,



фосфолипидной и в форме этиловых эфиров. Спектры были зарегистрированы с длиной волны возбуждающего излучения 785 нм.

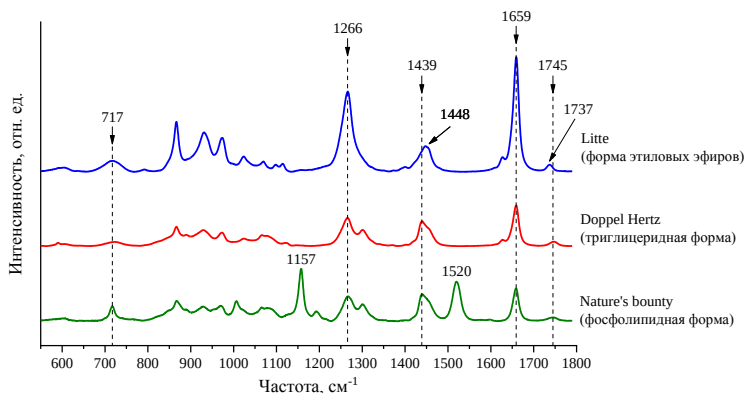


Рис. 1. Спектры КР БАД, содержащих омега-3 кислоты в различных формах, с указанием названия производителя.

Из рис. 1 видно, что спектры разных БАД имеют существенные отличия. Трёхкратная разница интенсивностей линий в диапазоне 800–1100 и около 1266 и 1659  $\text{см}^{-1}$  между спектрами разных БАД говорит о том, что дозировка омега-3 кислот в образцах Litte в три раза больше, чем в препаратах других производителей. Отличия в положении и форме линий около 717, 1439 и 1745  $\text{см}^{-1}$  указывают на различные формы омега-3 кислот. Наконец, интенсивные линии около 1157 и 1520  $\text{см}^{-1}$  в спектре БАД Nature's bounty указывают на присутствие каротиноида астаксантина в этом препарате.

Таким образом, в результате исследований различных БАД, содержащих омега-3 жирные кислоты, было выявлено, что методика на основе спектроскопии КР позволяет оценивать количественное содержание омега-3 кислот в образцах, отличать разные формы омега-3 кислот друг от друга и выявлять наличие в БАД вспомогательных веществ, например, каротиноидов.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Сагитовой Е.А. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-22-20100 <https://rscf.ru/project/24-22-20100/>.

## **Метод химически-активированной лазерной десорбции/ионизации в масс-спектрометрическом определении 8-замещенных производных хинолина**

**Лаптинская П.К.<sup>1</sup>, Чередова Д.И.<sup>2</sup>, Персидская О.К.<sup>1</sup>**

*1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*2- Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
факультет физики, Москва*

*E-mail: [polinalaptinskaya@gmail.com](mailto:polinalaptinskaya@gmail.com)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-185-187

Масс-спектрометрические методы определения органических веществ становятся все более востребованными в сферах контроля качества жизни и безопасности жизнедеятельности человека и животных. Органические соединения, используемые в сельском хозяйстве и медицине (ветеринарии), могут быть потенциально опасными для здоровья. Вещества, с которыми люди сталкиваются в своей профессиональной деятельности, связанной с химическим производством и хранением продуктов химического производства, могут проявлять высокую токсичность и даже быть канцерогенными.

8-замещенные производные хинолина применяются и в медицинской, и в химической практике. В медицине они чаще всего используются в качестве противомикробных, противогрибковых и противопаразитарных средств. Вещества данного ряда используют для проведения органического синтеза, в том числе лекарственных препаратов, и для связывания ионов металлов в комплексные соединения. Контакт с ними может приводить к отравлениям.

Зачастую, чтобы установить причину отравления, специалистам необходимо регистрировать вещества в организме на уровне следовых количеств. Самыми высокочувствительными в анализе большинства органических соединений являются методы с масс-спектрометрическим детектированием.

Основой таких методов является ионизация исследуемых молекул, которая приводит к образованию молекулярных ионов, либо заряженных фрагментов молекулы или же к появлению аддуктов (молекул с присоединенными заряженными атомами, или группами атомов, например, при протонировании).

В данной работе предложен новый масс-спектрометрический подход к определению 8-замещенных производных хинолина, характеризующийся простотой на этапах пробоподготовки и анализа.

Основные этапы такого процесса определения следующие:

На поверхность подложки-эмиттера ионов со специально приготовленным оксидным слоем молибдена наносят вещество (М) из группы 8-замещенных производных хинолина. Данное вещество вступает в реакцию с поверхностью подложки, формируя комплекс с оксидом молибдена.

Подложка помещается во времяпролетный масс-спектрометр, выполненный по линейной схеме, где поверхность подложки подвергается воздействию излучения третьей гармоники Nd:YAG лазера (длина волны 355 нм, длительность импульса 0,35 нс, частота повторения импульсов 175 Гц), что приводит к процессу десорбции иона комплексного соединения в форме  $[(M)_2MoO]^+$ .

Данный подход получил название химически-активированной лазерной десорбции/ионизации с переносом электрона (Chemically-activated laser-induced electron transfer desorption/ionization, CA-LETDI) [1]. Схема CA-LETDI на примере 8-оксихинолина представлена на рис. 1.

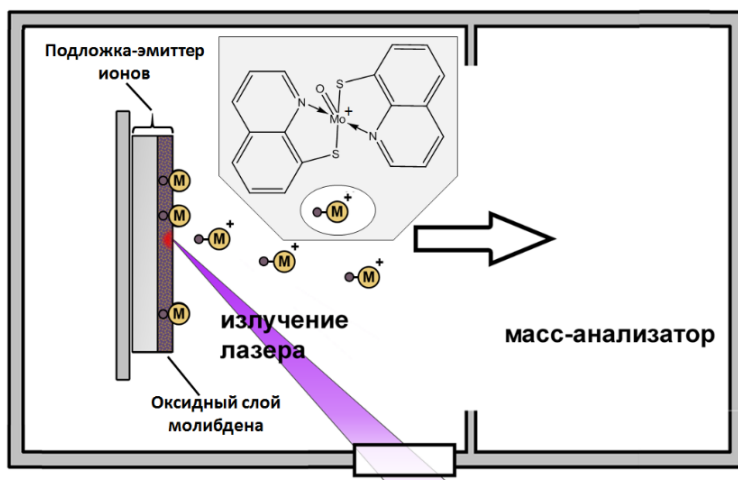


Рис. 1. Схема CA-LETDI на примере 8-оксихинолина

В работе показано, что процесс образования комплексного соединения в реакции между 8-замещенным производным хинолина и поверхностным материалом подложки-эмиттера ионов (оксидом молибдена) зависит от температуры. Так, при нагревании подложки до 80 °С в ходе проведения реакции мы получаем уровень ионного сигнала для  $[(M)_2MoO]^+$ , в 5 раз превышающий тот, который получают при проведении реакции без нагрева (при комнатной температуре).

Простота пробоподготовки и возможность увеличения аналитического сигнала за счет изменения температурных условий делают предложенный подход перспективным экспрессным методом для определения 8-замещенных производных оксихинолина на уровне 100 нг вещества, введенного в прибор, и ниже.

Авторы выражают благодарность научным руководителям: к.ф.-м.н. Никифорову С.М. и д.х.н. Гречникову А.А., а также коллегам к.т.н. Симановскому Я.О. и к.ф.-м.н. Пенто А.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждении полученных результатов.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки России, проект № 075-15-2022-315.

1. П.К. Лаптинская, И.И. Кузьмин. V Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели». Тезисы докладов. 2022, 128–130. DOI 10.24412/cl-35673-2022-1-128-130.

## **Структурный анализ материалов на основе поли(L-лактида): спектроскопия комбинационного рассеяния света и моделирование методом функционала плотности**

**Любимовский С.О.<sup>1</sup>, Васимов Д.Д.<sup>1</sup>, Кузнецов С.М.<sup>1</sup>, Анохин Е.В.<sup>2</sup>,  
Демина В.А.<sup>2</sup>, Бакиров А.В.<sup>2,3</sup>, Седуш Н.Г.<sup>2,3</sup>, Новиков В.С.<sup>1</sup>**

1- *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

2- *Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова  
Российской академии наук, Москва*

3- *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

*E-mail: [liubimovskii@kapella.gpi.ru](mailto:liubimovskii@kapella.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-188-190

Материалы на основе поли(L-лактида) (L-ПЛА): гомо- и сополимеры, полимер-полимерные смеси и композиты востребованы во многих областях деятельности человека, прежде всего для создания биоразлагаемых и биосовместимых медицинских изделий и экологически безопасных товаров с коротким сроком службы. Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света является мощным аналитическим инструментом исследования молекулярной и надмолекулярной структуры полимерных материалов. Актуальность работы определяется отсутствием методик количественного анализа структуры материалов на основе L-ПЛА по спектрам КР, которые могут использоваться для разработки новых материалов и изделий, а также контроля их структуры и качества в процессе производства, использования и утилизации.

В данной работе предложены методы количественного анализа структуры по спектрам КР для ряда материалов на основе L-ПЛА:

1. Синтезированных сополимеров L-лактида (L-ЛА) и  $\epsilon$ -капролактона (КЛ) с содержанием L-ЛА 10–90 мольных % в виде порошка, полученного в ходе синтеза, и плёнок, приготовленных методом горячего прессования.

2. Коммерческих сополимеров L-ЛА и КЛ (Corbion, Нидерланды) с содержанием L-ЛА 70–95 мольных % в виде гранул и плёнок, приготовленных из них методом горячего прессования.

3. Смесей L-ПЛА и поли( $\epsilon$ -капролактона) (ПКЛ) с содержанием L-ПЛА 70–94 мольных %, приготовленных смешением в расплаве.

4. Композитов L-ПЛА с гидроксиапатитом (ГАП) с содержанием ГАП 1–30 массовых %, приготовленных смешением в расплаве.

Спектры КР исследуемых материалов были зарегистрированы при возбуждении излучением с длиной волны 785 нм и со спектральным разрешением  $1,5 \text{ см}^{-1}$ . С целью определения фундаментальных закономерностей в зависимости спектра КР ПЛА от длины молекулы и её стереорегулярности было проведено моделирование методом функционала плотности структуры и спектров КР олигомеров L-ЛА и олигомеров, содержащих звенья L- и D-лактида.

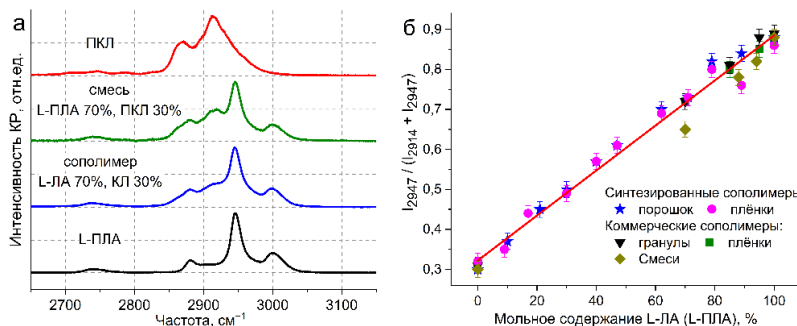


Рис. 1: а — экспериментальные спектры КР синтезированного сополимера L-ЛА/КЛ с 30моль% L-ЛА, смеси L-ПЛА/ПКЛ с 30 моль% L-ПЛА, гомополимеров L-ПЛА и ПКЛ; б — зависимость отношения  $I_{2947}/(I_{2914} + I_{2947})$  от мольного содержания мономерных звеньев L-ПЛА для сополимеров L-ЛА и КЛ и смесей L-ПЛА и ПКЛ.

В случае сополимеров L-ЛА и КЛ и смесей L-ПЛА и ПКЛ была предложена методика определения содержания мономерных звеньев L-ПЛА при измерении отношения интенсивности линии L-ПЛА с частотой  $2947 \text{ см}^{-1}$  к сумме интенсивностей этой линии и линии ПКЛ с частотой  $2914 \text{ см}^{-1}$  (рис. 1б). Мы показали, что этот диапазон спектра КР не зависит от степени кристалличности блоков L-ПЛА и, таким образом, может быть использован для определения состава материалов на основе L-ПЛА с любой степенью кристалличности блоков L-ПЛА.

Для композитов L-ПЛА и ГАП (рис. 2а) показано, что анализ высокоинтенсивной линии КР ГАП с частотой около  $960 \text{ см}^{-1}$  позволяет определять массовое содержание ГАП в композите.

Установлено, что степень кристалличности L-ПЛА во всех исследуемых образцах может быть оценена по отношению интенсивностей линий L-ПЛА с частотами около 411 и 874  $\text{см}^{-1}$ .

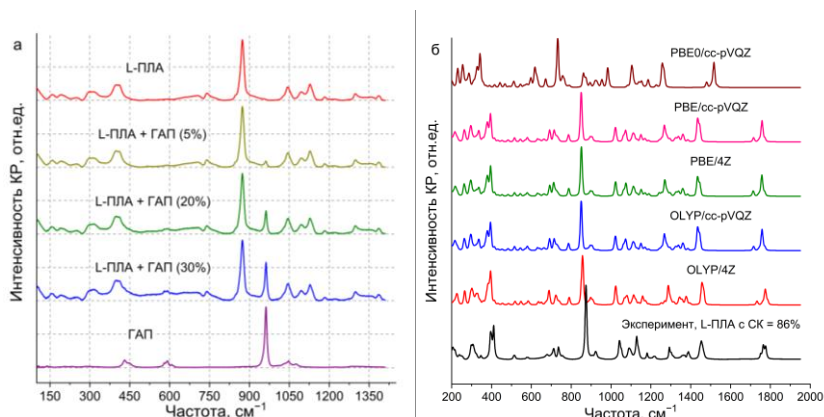


Рис. 2: а — экспериментальные спектры КР композитов L-ПЛА с ГАП; б — рассчитанные и уширенные спектры КР декамера L-ЛА в конформации спирали 10/3 в 5 приближениях и экспериментальный спектр образца L-ПЛА со степенью кристалличности 86%.

В целях определения лучшего приближения для моделирования спектров КР L-ПЛА были проведены расчеты для 16 комбинаций функционал плотности / базисный набор и показано, что лучшее совпадение с экспериментальным спектром высококристаллического образца L-ПЛА получено для 4 комбинаций: OLYP/4z, OLYP/cc-pVQZ, PBE/4z и PBE/cc-pVQZ (рис. 2б). Среднее отклонение рассчитанных значений частот от экспериментальных для 9 наиболее интенсивных и хорошо разрешенных линий в диапазоне до 2000  $\text{см}^{-1}$  составило 13  $\text{см}^{-1}$  для приближения OLYP/4z и 19  $\text{см}^{-1}$  для трёх других приближений. С использованием приближения OLYP/4z показано, что положение линии КР L-ПЛА около 400  $\text{см}^{-1}$  наиболее заметным образом зависит от длины молекулы, а полосы КР около 640  $\text{см}^{-1}$  наблюдаются только в спектрах нестереорегулярных молекул.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-22-00347 <https://rscf.ru/project/23-22-00347/>. Авторы выражают благодарность Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН за предоставление вычислительных ресурсов.

**Оптическое исследование  
взаимодействия наночастиц золота с лизоцимом  
при изменении кислотности среды**

**Молькова Е.А., Нагаев Е.И., Матвеева Т.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [bronkos627@gmail.com](mailto:bronkos627@gmail.com)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-191-193

Попадая в биологическую среду, любые наноразмерные системы мгновенно связываются с белками, образуя «белковую корону» [1]. Формирование белковой короны обусловлено термодинамикой водной среды и опосредовано кулоновскими и вандер-ваальсовыми силами, водородными связями и гидрофобными взаимодействиями [2]. Стабильность таких агрегатов может зависеть от большого числа факторов. Отсутствие достоверных знаний о влиянии образующейся белковой короны на дальнейшее взаимодействие наночастиц с окружающей средой является серьезной проблемой [3].

Целью данного исследования было изучение взаимодействия белков и наночастиц в зависимости от кислотности среды в широком диапазоне с использованием базовых оптических методов. Было показано, что использование оптических методов позволяет контролировать состояние коллоидов, содержащих белковые молекулы и наночастицы.

В экспериментах использовали белковые молекулы лизоцима, полученного из яичного куриного белка. Лизоцим растворяли в деионизированной воде до конечной концентрации  $7 \times 10^4$  нМ. Наночастицы золота были получены методом лазерной абляции. Средний гидродинамический диаметр составлял 18 нм, концентрация составляла 2,2 нМ. Для исследования были выбраны оптические методы динамического светорассеяния, спектроскопия поглощения и кругового дихроизма, флуоресцентная спектроскопия, рефрактометрия.

Значение рН оказывает существенное влияние на распределение по размерам наночастиц золота и молекул лизоцима в коллоидах. При кислотности среды выше 5 в коллоиде начинают появляться димерные формы лизоцима, что хорошо согласуется с



литературными данными [4]. В растворе лизоцима при pH выше 7,5 мономерные и димерные формы исчезают и появляются крупные агрегаты. Вероятно, это связано с агрегацией димеров [5]. Кроме того, при добавлении наночастиц золота процесс агрегации начинается при более низких значениях pH (на 1–2 единицы). О существовании переходного процесса для лизоцима в присутствии наночастиц золота при кислотности 7,5 также свидетельствует резкий скачок показателя преломления на длинах волн 589,3 и 632,9 нм. Наночастицы золота, стабильные при pH 6,0–11,0, агрегируют при добавлении к ним лизоцима из-за образующейся на наночастицах «белковой короны». Напротив, при pH 1,5–4,0 лизоцим препятствует агломерации наночастиц золота. Таким образом, в коллоидной системе, содержащей как лизоцим, так и наночастицы золота, было определено взаимное влияние субстратов. Спектроскопией кругового дихроизма было показано, что при pH 3,9 и 7,5 наблюдается увеличение количества  $\alpha$ -спиралей и уменьшение количества  $\beta$ -листов в структуре лизоцима в присутствии наночастиц золота.

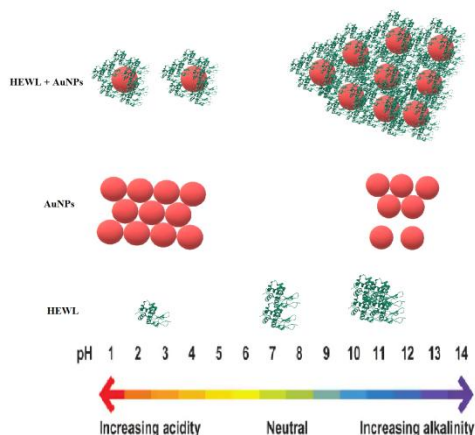


Рис. 1. Влияние pH на коллоиды лизоцима, ( $7 \times 10^4$  нМ), золотых наночастиц (2,2 нМ), лизоцим ( $7 \times 10^4$  нМ) + золотые наночастицы (2,2 нМ)

1. Cai R. and Chen C., Advanced Materials, 2018, 1805740.
2. Корп Т., Int. J. of Bio. Macromol., 2021, **169**, 290–301.

3. Gebauer M., Malissek S., Simon S., et al., *Langmuir*, 2012, **28**, 9673–9679.
4. Vilcacundo R., Mendez P., Reyes W., et al., *Sci. Pharm.*, 2018, **86**, 48.
5. Ermakova E.A., Makshakova O.N., Zuev Y.F., et al., *J. of Mol. Graph. and Mod.*, 2021, **106**, 107917.

## **Изучение влияния лазерного пробоя на свойства двух модельных белков при добавлении к ним металлических наночастиц**

**Нагаев Е.И., Матвеева Т.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [nagaev\\_e@kapella.gpi.ru](mailto:nagaev_e@kapella.gpi.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-194-195

Применение лазеров в медицине позволило уменьшить сложность традиционных хирургических воздействий, а также проводить новые, ранее не доступные с помощью других методов (например, лазерную коагуляцию). В зависимости от длины волны, режима работы и мощности, возможно проводить широкий спектр воздействий: гипертермия, эвапорация, абляция с целью удаления ткани, коагуляция. Лазеры, работающие в непрерывном режиме, способны оказывать термическое воздействие на большие объемы тканей. Однако, когда речь заходит о минимально инвазивных операциях, предпочтение отдается импульсным лазерам, обладающим локальным воздействием. Импульсные лазеры способны уничтожать камни в почках, удалять татуировки, сшивать ткани (к примеру, операции на сетчатке глаза при помощи фемтосекундного лазера). Взаимодействие импульсного лазерного излучения с биологическими тканями хорошо изучено, однако, мало информации о взаимодействии с биологическими молекулами, к примеру, с белками. Белки выполняют огромное число разных функций в организме. Так, они являются строительным материалом клеток, участвуют в работе иммунной системы, помогают в восстановлении других белков. Функции, которыми наделен белок, определяются его пространственной структурой – конформацией. При изменении конформации белок может потерять изначальные функции и приобрести новые. Так же, в процессе изменения конформации возможно образование белковых олигомеров, аморфных агрегатов и амилоидных фибрилл. Поэтому понимание того, как импульсное лазерное излучение воздействует на данные молекулы, является интересным.

Ранее нами было изучено влияние импульсного излучения Nd:YAG лазера на оптические свойства растворов бычьего

сывороточного альбумина. Было показано, что после 30-минутного воздействия подавляющее большинство молекул БСА (99 %>) оставались в виде мономеров. Однако, была обнаружена частичная агрегация и фрагментация молекул. Известно, что в присутствии металлических наночастиц увеличивается вероятность оптического пробоя. Поэтому в данной работе рассмотрено влияние лазерного пробоя, вызванного Nd:YAG лазером, на свойства комплексов белок-наночастица. В качестве белков были взяты лизоцим и человеческий иммуноглобулин IgG. К растворам белков добавляли наночастицы золота и  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , покрытые цитратной оболочкой. Параметры лазерного излучения были следующими: длина волны 532 нм (вторая гармоника), частота следования импульсов 1 кГц, длительность импульса 3,6 нс, ширина перетяжки ~40 мкм. В качестве методов анализа использовали спектроскопию поглощения УФ-видимого диапазонов, флуоресцентную спектроскопию с возможностью построения карт эмиссия-возбуждение, динамическое светорассеяние, рефрактометрию. В результате показано, что при воздействии на комплекс белок-наночастица импульсного лазерного излучения происходит частичная агрегация молекул белка, их фрагментация и денатурация (например частичное разрушение «белковой короны» для экспериментов с лизоцимом).

Авторы выражают благодарность заведующему центром биофотоники, д.б.н. Гудкову С.В. и к.б.н. Саримову Р.М. за помощь в постановке задачи и обсуждение результатов, к.ф.-м.н. Симакину С.В. за помощь в проведении экспериментов по лазерному пробую.

## Оптические методы в задаче идентификации микроорганизмов

**Павлов О.О.<sup>1</sup>, Ширшин Е.А.<sup>1</sup>, Якимов Б.П.<sup>1</sup>, Лысухин Д.Д.<sup>1</sup>**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва*

*E-mail: [pavlov.oo18@physics.msu.ru](mailto:pavlov.oo18@physics.msu.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-196-197

В клинической практике рутинно возникает задача идентификации микроорганизмов в биологических пробах с целью определения возбудителя заболевания для постановки пациенту корректного диагноза. Чем быстрее будет проведено распознавание, тем выше шанс своевременного назначения соответствующей антибактериальной терапии и успешного выздоровления пациента. Классическим методом идентификации, доступным даже менее крупным микробиологическим лабораториям, является биохимический анализ, суть которого заключается в последовательном анализе взаимодействия материала пробы с рядом биохимических агентов. Данная процедура крайне трудо- и времязатратна и принципиально ограничена скоростью протекания реакций. Примером современного метода идентификации, доступного более крупным лабораториям, является масс-спектрометрия [1], однако при использовании подобных методов необходима предварительная подготовка выращенной в питательной среде биологической пробы перед идентификацией, увеличивающая время, затрачиваемое на идентификацию.

В настоящей работе была исследована возможность идентификации микроорганизмов по широкому спектру классов с использованием оптического сигнала от содержимого биологической пробы как пример процедуры, не требующей предварительной пробоподготовки. В качестве оптических методов, для которых исследовалась возможность идентификации микроорганизмов с высоким уровнем специфичности и чувствительности были выбраны флуоресцентная спектроскопия колоний микроорганизмов с возбуждением на нескольких длинах волн и оптическая визуализация чашек Петри, содержащих микроорганизмы, в белом свете. Для выявления сложных закономерностей в данных оптического отклика применялись глубокие нейронные сети. В ходе исследования была

произведена оценка точности идентификации микроорганизмов при использовании отдельно только данных оптической визуализации и флуоресцентной спектроскопии, а также были предложены методы объединения данных обеих оптических модальностей в единой модели классификатора, использующей преимущества каждого типа данных оптического отклика в идентификации отдельных категорий микроорганизмов.

1. Hou T.Y., Chiang-Ni C., Teng S.H., J. Food Drug Anal. 2019, **27**(2), 404–414.

## **Биофизические аспекты повышения продуктивности растений при выращивании под нанокompозитными фотоконверсионными материалами**

**Пасхин М.О., Казанцева Д.В., Шумейко С.А.**

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [pasjhin.mark@mail.ru](mailto:pasjhin.mark@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-198-200

Современное сельское хозяйство невозможно представить без внедрения умных и эффективных технологий. К ним, несомненно, относятся технологии направленного регулирования освещенности сельскохозяйственных растений, поскольку свет является одним из решающих факторов, определяющих рост и развитие растений [1]. Количество и качество естественного света определяют экономику и целесообразность растениеводства в различных регионах мира. Для стимуляции фотосинтетических процессов в растениях их освещают светом в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, называемым фотосинтетически активным излучением. В зависимости от климатических условий выращивания фермеры затеняют или дополнительно освещают растения, а также меняют спектр света, попадающего на растения. Одним из способов изменения спектрального состава света является использование фотоконверсионных покрытий, преобразующих малоиспользуемый растениями свет в фотосинтетически активное излучение [2, 3].

Нами разработаны несколько металлосодержащих и углеродсодержащих фотоконверсионных покрытий на основе наночастиц:  $\text{Sr}_{0,955}\text{Yb}_{0,020}\text{Er}_{0,025}\text{F}_{2,045}$  и  $\text{Sr}_{0,910}\text{Yb}_{0,075}\text{Er}_{0,015}\text{F}_{2,090}$  (1),  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (2),  $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$  (3), оксид графена (4) и  $\text{ZnO}$  (5). Наночастицы были получены различными методами: соосаждением, лазерной фрагментацией и гидротермально-микроволновой обработкой. Наночастицы (1)–(4) смешивали с фторопластовым лаком и наносили методом холодного синтеза при комнатной температуре; наночастицы (5) смешивали с акриловым полимером и наносили с помощью магнетрона. Покрытие с наночастицами (1) поглощает свет в ближнем инфракрасном диапазоне и флуоресцирует в зелено-красном диапазоне. Покрытия, содержащие наночастицы (2)–(5),

поглощают свет в ультрафиолетовом диапазоне и флуоресцируют в красном (2), оранжевом (3), сине-красном (4) и синем (5) диапазонах.

Эффективность полученных фотоконверсионных покрытий изучали при выращивании растений. В результате было показано, что эти покрытия улучшают рост и развитие растений. Практически все покрытия улучшали морфологические показатели растений. Покрытия на основе  $\text{Sr}_{0,955}\text{Yb}_{0,020}\text{Er}_{0,025}\text{F}_{2,045}$  и  $\text{Sr}_{0,910}\text{Yb}_{0,075}\text{Er}_{0,015}\text{F}_{2,090}$  ускорили адаптацию растений томата к новому типу освещения, за счёт чего растения стали больше. Покрытие на основе  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  ускорило адаптацию фотосистем растений томата при включении света, что позволило растениям использовать больше солнечной энергии для фотосинтеза и меньше - для процессов репарации. Однако это покрытие никак не повлияло на растения огурца. Покрытие на основе  $\text{Eu}^{3+}:\text{LaF}_3$  не влияло на параметры роста и развития растений, однако способствовало адаптации растений к стрессовым абиотическим факторам, в частности к высоким и положительным низким температурам. Это связано с тем, что дополнительный оранжевый свет способствует увеличению синтеза антиоксидантных ферментов, таких как супероксиддисмутаза, пероксидаза и т.д. [4]. Фотоконверсионное покрытие на основе оксида графена благодаря широкому спектру флуоресценции в диапазоне фотосинтетически активного излучения значительно увеличило рост и развитие растений томата. Покрытие на основе наночастиц  $\text{ZnO}$  улучшило морфологические показатели растений перца и огурца на 25–30%. Кроме того, это покрытие обладало бактериостатическими свойствами, но было биосовместимо с эукариотическими клетками.

Таким образом, даже небольшие изменения соотношение света разных длин волн (красного к дальнему красному, синего к красному и т.д.) могут значительно улучшить ростовые показатели растений.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ (075-15-2022-315) на организацию и развитие научно-исследовательского центра мирового уровня «Фотоника».

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.б.н. Гудкову С.В. и к.б.н. Яныкину Д.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.



1. S.W. Hogewoning, E. Wientjes, P. Douwstra, G. Trouwborst, W. van Ieperen, R. Croce, J. Harbinson, Photosynthetic Quantum Yield Dynamics: From Photosystems to Leaves, *Plant Cell*, 24, 1921–1935, (2012).
2. M.O. Pashkin, D.V. Yanykin, S.V. Gudkov, *Horticulturae*. 2022, **8**, 885.
3. S.V. Gudkov, R.M. Sarimov, M.E. Astashev, et al., *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2024, **194**(2), 208–226.
4. A. Brazaityte, P. Duchovskis, A. Urbonaviciute, et al., *Zemdirb.-Agric*. 2009, **96**, 102–118.

## Контроль фотодинамической инактивации патогенной микрофлоры с помощью нанофотосенсибилизаторов

**Рощин И.А.<sup>1</sup>, Уденеев А.М.<sup>1,2</sup>, Бородин А.В.<sup>2</sup>, Москалев А.С.<sup>2</sup>,  
Калягина Н.А.<sup>1,2</sup>**

*1 - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

*2 - Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

E-mail: [Bloreo@yandex.ru](mailto:Bloreo@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-201-203

Флуоресцентная визуализация активно применяется в биомедицине, особенно в контексте фотодинамической терапии (ФДТ), в том числе при диагностике и терапии длительно незаживающих ран. Метод ФДТ основан на введении в организм фотосенсибилизатора (ФС), который селективно накапливается в поражённых тканях, в которых наблюдается усиленная по сравнению с нормальными тканями микроциркуляция. При облучении зоны накопления ФС светом в диапазоне его поглощения, происходит активация ФС и запуск фотохимических реакций с образованием синглетного кислорода, уничтожающего патологические клетки. Важно, что многие ФС обладают флуоресцентными свойствами, что позволяет использовать методы флуоресцентной визуализации для контроля и планирования процесса ФДТ.

Механизмы, способствующие заживлению ран при ФДТ, пока не полностью изучены [1]. Обычно заживление ран протекает последовательно, начиная с фазы коагуляции и гемостаза, переходя к продукции медиаторов воспаления и факторов роста, а затем к пролиферации, миграции и дифференцировке клеток, завершаясь сужением и ремоделированием раны, что приводит к образованию рубцовой ткани [2].

Целью исследования являлась разработка метода контроля фотодинамической инактивации патогенной микрофлоры, применяемого в диагностике и лечении ран, в том числе, длительно незаживающих при помощи созданного прототипа видеофлуоресцентного устройства. Для достижения цели был проведен синтез наноформ хлорина е6 и метиленового синего; изучены флуоресцентные свойства этих препаратов в молекулярной и наноформе; подобраны оптимальные концентрации ФС к

конкретным фильтрам; проанализированы базы данных для оценки времени выгорания МС в результате длительного воздействия излучения.

При клинических испытаниях прототипа видеофлуоресцентного устройства, на поверхности раны выбиралось несколько точек (пример на рис. 1 а)). Критерием выбора точек являлась их отличность друг от друга, как на одном изображении, так и в динамике. Зависимости яркости флуоресценции (ФЛ) от времени, зафиксированные нашим прототипом видеофлуоресцентного устройства при клинических испытаниях показаны на рис. 1 б).

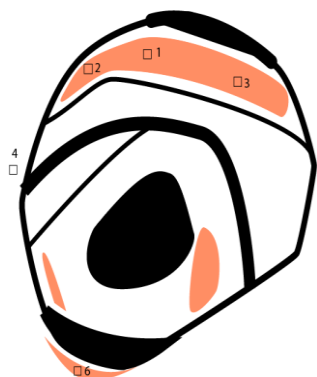
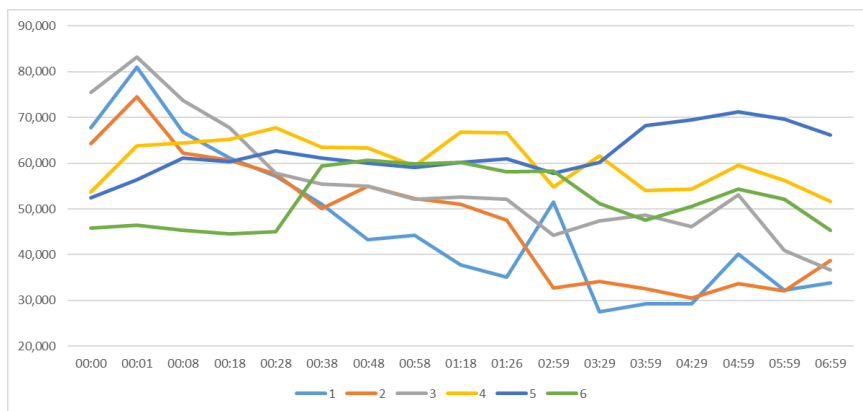


Рис. 1. а) схематичное изображение пролежневой раны. 1–3 — область раны с самой сильной ФЛ; 4 — край раны; 5 — область без ФЛ; 6 — подкожная ФЛ; б) график изменения яркости ФЛ в ходе проведения ФДТ у пациента с пролежневой раной. 1–3 — основной очаг заражения; 4 — край раны; 5 — область без ФЛ; 6 — подкожная ФЛ.



Разработанный метод контроля фотодинамической инактивации патогенной микрофлоры при помощи созданного прототипа видеофлуоресцентного устройства, может применяться в диагностике длительно незаживающих ран. Метод позволяет

проводить анализ распределения ФС хлоринового ряда и метиленового синего, в том числе в наноформах, в воспаленных тканях и при некрозах и корректировать режим воздействия при назначении процедуры ФДТ, с использованием ФС хлоринового ряда и метиленового синего. Это дает возможность точно настраивать параметры воздействия при назначении ФДТ с использованием указанных ФС и способствует улучшению результатов лечения при ФДТ.

1. Grandi V., Corsi A., Pimpinelli N., Bacci S. *Biomedicines*. 2022, **10**(7), 1624.
2. Shiryaev A., Ivankov M., Voitova A., et al., *Photonics*. 2024, 10.

## Эффективное возбуждение и регистрация единичных флуоресцентных молекул в волноводе нулевой моды (ZMW)

**Сафонова А.М.<sup>1,2</sup>, Калмыков А.С.<sup>1</sup>, Гритченко А.С.<sup>1</sup>**

1 - Институт спектроскопии Российской академии наук, Москва, Троицк

2 - Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

E-mail: [amsafonova\\_1@edu.hse.ru](mailto:amsafonova_1@edu.hse.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-204-206

Оптическое обнаружение и визуализация одиночных атомов и молекул являются одними из значимых задач нанофотоники. Их решение имеет огромное научное и практическое значение для исследования эффектов квантовой электродинамики [1], разработки одномолекулярных устройств [2], визуализации биологических тканей [3], наблюдения за кинетикой химических реакций внутри клетки [4], исследования внутриклеточной динамики биомолекул [5] и многих других приложений [6].

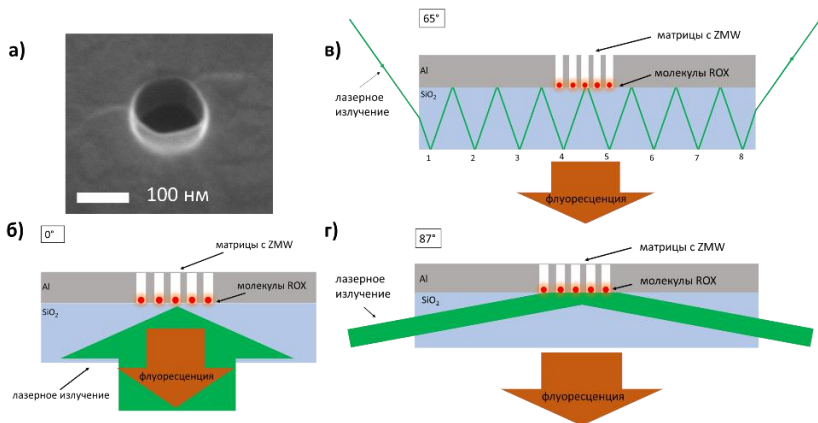


Рис. 1: а) СЭМ (сканирующая электронная микроскопия) фотография ZMW, б)–г) — схематическое изображение образца при реализации схем возбуждения под различными углами.

Регистрация флуоресценции единичной молекулы является довольно деликатным измерением, так как требует тщательного выбора интенсивности лазерного излучения, времени экспозиции, подбора схемы возбуждения и т.д. Основным подходом в улучшении регистрации слабых оптических сигналов является снижение

паразитной засветки. Один из наиболее подходящих подходов для детектирования флуоресценции единичных молекул основан на использовании наноструктур, изготовленных в непрозрачной металлической плёнке — так называемых волноводов нулевой моды (zero mode waveguide, ZMW) [7]. ZMW наноструктуры представляют собой нанотверстия диаметром порядка 100 нм, изготовленные в оптически непрозрачной металлической пленке, толщиной около 100 нм (рис. 1а).

Несмотря на большое количество работ, в которых используются ZMW, вопрос эффективного возбуждения и регистрации флуоресценции единичных молекул в ZMW до сих пор остаётся открытым. В настоящей работе представлены результаты поисковых исследований эффективного возбуждения и регистрации флуоресценции единичных молекул ROX (Rhodamine X) в ZMW диаметром 100 нм изготовленных в плёнке алюминия толщиной 100 нм на основе измерения пропускания света через ZMW (рис. 2а) и измерения флуоресценции молекул в трех схемах возбуждения и регистрации: (1) эпифлуоресцентная схема, (2) возбуждение под углом вблизи угла полного внутреннего отражения света, (3) возбуждение под скользящим углом (рис. 1 б–г).

Как показали результаты измерений, выбор условий для оптической микроскопии единичных молекул в ZMW является критически важным при проведении измерений с большим числом ZMW одновременно (так называемые параллельные измерения). Так, увеличение диаметра лазерного луча позволяет увеличить количество ZMW в которых производятся измерения. Однако, это приводит к катастрофическому росту паразитной люминесценции. Например, в классической эпифлуоресцентной схеме лазерный луч проходит через объектив микроскопа, что приводит к возникновению автофлуоресценции, так что при диаметре луча 300 мкм сигнал флуоресценции от единичных молекул становится сравним с фоновой засветкой (рис. 2б).

Переход к схеме возбуждения под углом позволяет избавиться от паразитной автофлуоресценции объектива, что приводит не только к увеличению соотношения сигнал/шум и проведению большего количества параллельных измерений, но и к возможности детектировать более низкие концентрации аналита.

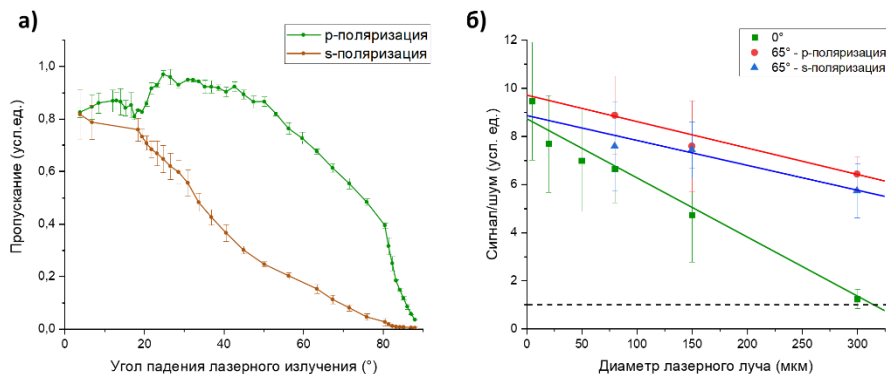


Рис. 2: а) Прохождение света различной поляризации через ZMW диаметром 100 нм в зависимости от угла падения лазерного излучения, б) соотношение сигнал/шум в различных схемах возбуждения и регистрации молекул в зависимости от диаметра и поляризации лазерного луча, сплошные линии – линейная аппроксимация экспериментальных данных.

Проведённые измерения позволили достигнуть высокой эффективности измерения флуоресценции единичных молекул, позволяя измерять кинетики их взаимодействия с поверхностью.

Авторы выражают благодарность Мелентьеву П.Н. и Балыкину В.И. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов. Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-42-00049.

1. K.P. Nayak, P.N. Melentiev, M. Morinaga, et al., Opt. Express. 2007, **15**, 9.
2. J.F. Rossier, Nature Materials. 2013, **12**, 480.
3. J.G. Ritter, R. Veith, A. Veenendaal, et al., PLoS ONE. 2010, **5**, e11639.
4. T. Yanagida and Y. Ishii, *Single Molecule Dynamics in Life Science* (John Wiley & Sons, 2008).
5. V. Levi and E. Gratton, Cell Biochemistry and Biophysics. 2007, **48**, 1.
6. J. Zlatanova and K. Van Holde, Molecular Cell. 2006, **24**, 317.
7. M.J. Levene, J. Korlach, S.W. Turner, et al., Science. 2003, **299**, 682.

## Цитотоксичность

### диэлектрических наночастиц на основе диоксида циркония и их возможное применение в медицине

**Хрущалина С.А., Шляпкина В.И., Кукаркина С.Э., Зимин Е.Э.,  
Таратынова А.Д., Журавлев М.В., Гадеева А.А., Бобров В.С.,  
Алексеева А.С.**

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

*E-mail: [anabel-2005@yandex.ru](mailto:anabel-2005@yandex.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-207-209

Диэлектрические частицы, легированные высокими концентрациями редкоземельных (РЗ) ионов, могут значительно нагреваться при их возбуждении интенсивным лазерным излучением [1]. Этот эффект может использоваться для усиления термического действия лазерного излучения, например, на биологическую ткань. В ходе экспериментов *in vitro* и *in vivo* нами было показано, что подобный эффект наиболее выражен для частиц на основе диоксида циркония с иттербием [2]. В настоящей работе представлены результаты исследования цитотоксичности частиц  $ZrO_2$ –30 мол.%  $Yb_2O_3$ , которые могут найти применение в лечении поверхностных опухолей.

Частицы  $ZrO_2$ –30 мол.%  $Yb_2O_3$  получали методом соосаждения с последующим отжигом при различных температурах – 500, 800 и 1150 °С в течение 6 часов. Фазовый состав образцов исследовался методом рентгеновской дифрактометрии. Морфология и размеры полученных частиц изучались методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Также размеры частиц оценивались методом динамического рассеяния света с помощью анализатора размеров наночастиц. Спектрально-люминесцентные свойства исследовались с использованием в качестве источника возбуждения полупроводникового лазерного диода с длиной волны излучения 980 нм (максимальная выходная мощность 2 Вт).

Исследование цитотоксичности частиц диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттербия, производили на клеточной культуре гепатомы мыши Mh22a, а также на сфероидах, сформированных из данной клеточной культуры. Исследования



проводились при воздействии лазерным излучением с длиной волны 980 нм и без него.

Рентгенофазовый анализ частиц  $\text{ZrO}_2$ –30 мол.%  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  показал, что все они являются однофазными и представляют собой твердые растворы с кубической структурой (пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ ). Размеры областей когерентного рассеяния возрастали с увеличением температуры отжига и составляли 5, 10 и 99 нм для 500, 800 и 1150 °С соответственно.

Возбуждение частиц  $\text{ZrO}_2$ –30 мол.%  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  непрерывным лазерным излучением с длиной волны 980 нм и плотностью мощности  $J=0,9 \text{ кВт/см}^2$  приводило к возникновению в них широкополосного излучения в диапазоне 400–900 нм, которое является тепловым. Также проведенные исследования спектрально-люминесцентных свойств показали, что образцы  $\text{ZrO}_2$ –30 мол.%  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  с разными размерами частиц в равной степени способны нагреваться при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 980 нм.

Исследования цитотоксичности частиц выявили, что частицы размером 99 нм характеризуются наибольшими значениями  $\text{IC}_{50}$  при воздействии лазером и без воздействия — 14,9 и 41,0 мг/мл, соответственно. Цитотоксичность частиц наблюдалась в концентрациях 50,0 и 25,0 мг/мл при воздействии лазерного излучения 980 нм. При воздействии лазерным излучением с длиной волны 980 нм на клеточные сфероиды во всех исследуемых концентрациях частиц отмечались мёртвые клетки и клетки с признаками апоптоза, отмечена масштабная гибель клеток. Достоверные значения были отмечены на концентрациях 25 и 12,5 мг/мл, что коррелирует с  $\text{IC}_{50}$  для данной клеточной культуре по исследованию цитотоксичности.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Рябочкиной П.А., д.м.н. Куликову О.А., Жаркову М.Н., к.ф.-м.н. Кяшкину В.М., к.ф.-м.н. Табачковой Н.Ю. за помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-72-01099, <https://rscf.ru/project/23-72-01099/>.

1. Ryabochkina P.A., Khrushchalina S.A., Belyaev A.N., et al., Quant. Electron. 2021, **51**, 1038–1043.

---

2. Khrushchalina S.A., Yurlov I.A., Ryabochkina P.A., et al., 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, 1-1.

## **Управление бионическим протезом на основе датчиков электромиограммы**

**Чиркова Я.Д., Деева О.К., Букреева Е.А.**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва*

*E-mail: [yana.chirkova.2003@mail.ru](mailto:yana.chirkova.2003@mail.ru)*

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-210-212

Исследование посвящено разработке и созданию модели протеза верхней конечности, использующей электромиограмму действующей руки как источник сигналов для управления односхватовым протезом кисти руки.

В настоящее время активное внедрение высокотехнологичных систем в сферу медицины и здравоохранения требует поиска новых путей диагностики заболеваний, наблюдения за состоянием пациента и повышения качества жизни человека. Использование датчиков электромиограммы (ЭМГ) [1] и обработка результатов такого исследования позволяет осуществить множество инновационных решений задач в сферах послеоперационного восстановления и протезирования: общий анализ работы мышц пациента, мониторинг состояния мышц пациентов, находящихся в коме, выявления аномалий биомеханики движений человека или животного.

Объектом исследования является электрическая активность мышц верхней конечности и способы ее регистрации и использования в медицинских целях. Также в процессе работы были изучены особенности работы ЭМГ-датчика и способы программной обработки сигналов.

Поверхностная ЭМГ, используемая в данном исследовании, оценивает функцию мышц путем регистрации мышечной активности с поверхности кожи над мышцей. Для исследований использовали три электрода, которые прикрепляли к руке. На сигнал, считанный поверхностными электродами, значительно влияет глубина подкожной клетчатки в месте расположения электрода, которая может значительно варьироваться в зависимости от веса пациента.

ЭМГ датчик регистрирует электрический потенциал, генерируемый мышечными клетками в момент их активности. Сигнал имеет достаточно сложную форму с большим уровнем низкочастотных и высокочастотных помех. Амплитуда колебаний

потенциала мышцы, как правило, не превышает нескольких милливольт, а их длительность — 20–25 мс.

Для демонстрации результатов исследования была разработана модель протеза верхней конечности, которая позволяет сжимать и разжимать кисть протеза посредством напряжения мышц свободной руки пациента. Устройство (рис. 1) состоит из датчика ЭМГ AD8232 с тремя электродами, платы Arduino UNO [2], шагового двигателя с платой управления и модели протеза, соединенными пальцами которой с помощью шагового двигателя можно управлять.

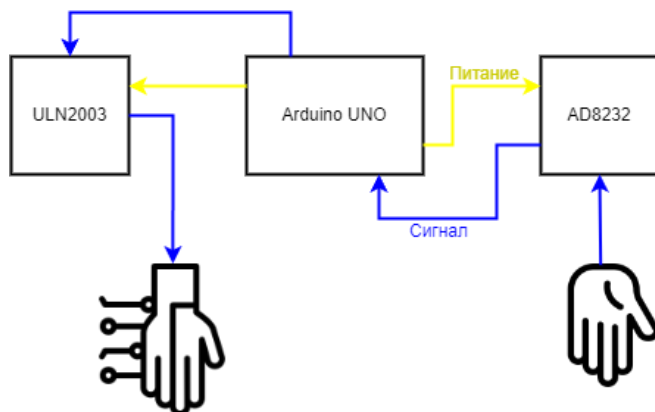


Рис. 1. Структурная схема устройства управления.

Была написана программа для обработки сигнала, поступающего с ЭМГ датчика, прикрепленного к руке пациента электродами. Для устранения электрических помех сигнала в программу было включено двухполупериодное выпрямление (выделение абсолютного значения), программная фильтрация с помощью фильтров высоких и низких частот. Программа загружалась на плату Arduino UNO с помощью ноутбука. На экране отображался обработанный сигнал в виде графика зависимости напряжения от времени. В дальнейшем полученный сигнал используется для управления шаговым двигателем, напрямую связанным с подвижными частями модели.

Представленная в данной работе система позволяет не только отслеживать модифицированную электромиограмму пациента, но и наблюдать движения его пальцев на бионической модели протеза, что

делает данное решение более наглядным. В дальнейшем планируется использование более широкого спектра датчиков для обеспечения раздельного движения пальцами и выполнения различных жестов. Также возможно расширить функционал данной модели благодаря развитию алгоритмов обработки сигналов ЭМГ для более точного управления [3].

Авторы выражают благодарность заведующему кафедрой Компьютерных медицинских систем НИЯУ МИФИ д.т.н. Никитаеву И.О. и к.ф.-м.н. Пашенцеву В.Н. за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

1. Горохова Н.М., Головин М.А., Чежин М.С. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019, **19**(2), 314–325.
2. Ehrmann G., Blachowicz T., Homburg S.V., et al., Bioengineering. 2022, **9**(2), 84.
3. Бильгильдеев М.Г., Осмоналиев И.Ж., Байкеев Р.Ф., Практическая медицина. 2021, **19**(4), 146–152.

**Получение водных коллоидных растворов  
на основе наночастиц моноклинного фосфата лантана,  
активированных ионами празеодима, и их сочетанный эффект  
под действием рентгеновского излучения на примере *in vitro***

**Шайдулин А.Т.<sup>1,2</sup>, Жарков М.Н.<sup>3</sup>, Хуторская И.А.<sup>3</sup>,  
Пиняев С.И.<sup>3</sup>, Якобсон Д.Э.<sup>3</sup>, Чернобай Р.А.<sup>3</sup>**

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

2- Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

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

E-mail: [shatarte@yandex.ru](mailto:shatarte@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-213-215

Водные коллоидные растворы на основе наночастиц (НЧ) моноклинного фосфата лантана ( $m\text{-LaPO}_4$ ), активированных ионами празеодима ( $\text{Pr}^{3+}$ ) с различными размерами и концентрациями  $\text{Pr}^{3+}$ , были синтезированы гидротермально-микроволновым (ГТМВ) методом (200 °С, 2 часа, 2 магнетрона, 2,45 ГГц) для применения в качестве основы для создания препарата, направленного на лечение раковых опухолей, эффект которого проявляется в результате сочетанного воздействия лучевой терапии и излучаемых НЧ  $m\text{-LaPO}_4\text{:Pr}^{3+}$  УФ-С фотонов под действием рентгеновского излучения.

Размеры и морфология НЧ контролировались изменением условий ГТМВ синтеза (уровень pH и величина избытка анионов-осадителей), в результате чего были получены: нановолокна (соотношение сторон до 60), длинные наностержни (соотношение сторон до 10) и короткие наностержни (соотношение сторон до 5). В зависимости от условий синтеза и размеров НЧ (см. рис. 1), оптимальная концентрация примесных центров  $\text{Pr}^{3+}$ , при которой яркость рентгенолюминесценции (РЛ) была максимальной отличалась для различных типов НЧ: 2 ат.% для нановолокон, 5 ат.% для длинных наностержней, 7 ат.% для коротких наностержней (рис. 1б).

Способность НЧ образовывать стабильные водные коллоиды является следствием образования двойного электрического слоя (ДЭС) у их поверхности. Так как при всех синтезах использовался избыток соли-осадителя ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), то фосфат-ионы  $[\text{PO}_4]^{3-}$  являются

потенциалоопределяющими ионами (ПОИ), а ионы калия ( $K^+$ ) составляют адсорбционный и диффузный слои, что было косвенно подтверждено энергодисперсионным анализом. Для биофункционализации НЧ, ПОИ могут быть заменены на ионы  $La^{3+}$  добавлением соответствующей растворимой соли к коллоидному раствору. Это можно использовать для дальнейшего создания связи  $La^{3+}$ -органическое соединение. Данная процедура была проведена для коллоидного раствора длинных наностержней  $m-LaPO_4:Pr^{3+}$  (5 ат%),  $La(NO_3)_3$  и органического полимера PVP-40000, что позволило предотвратить агрегацию модифицированных коллоидных НЧ в 5 % растворе глюкозы.

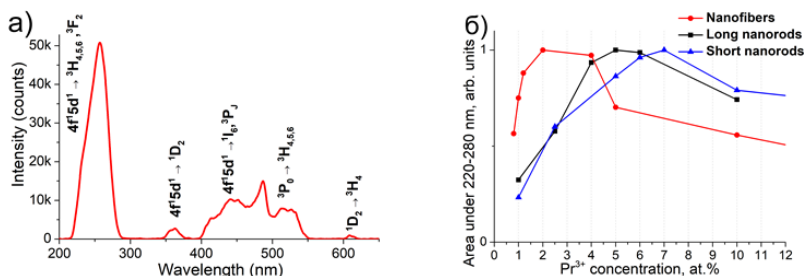


Рис. 1. а) Типичный вид спектра РЛ порошка НЧ  $m-LaPO_4:Pr^{3+}$  с обозначением электронных переходов в  $Pr^{3+}$ . б) Зависимости яркости РЛ от концентрации  $Pr^{3+}$ : красная линия — нановолокна (7–15×30–600 нм, диаметр×длина); черная линия — длинные наностержни (5–8×20–60 нм); синяя линия — короткие наностержни (4–6×13–21 нм)

Проведены первые исследования цитотоксичности коллоидных растворов на основе длинных не модифицированных наностержней с составами  $LaPO_4$  и  $LaPO_4:Pr^{3+}$  (10 ат.%), а также коротких наностержней состава  $LaPO_4:Pr^{3+}$  (10 ат.%) на культуре фибробластов L-929 с помощью МТТ-теста. Результаты данного исследования показали (рис. 2, не штрихованные столбики), что все образцы относятся к малотоксичным веществам.

Достоверное рентгеноиндуцированное снижение выживаемости клеточной культуры при дозе облучения в 8 Грей (режим работы прибора: 80 кВ, 15 мА) (рис. 2, штрихованные столбики) оказал только один коллоидный раствор, состоящий из длинных наностержней  $LaPO_4:Pr$  (10 ат.%) с концентрацией НЧ

1 мг/мл (снижение выживаемости на 21 % по сравнению с группой клеток, инкубированной с теми же НЧ, но не облучённой рентгеном).

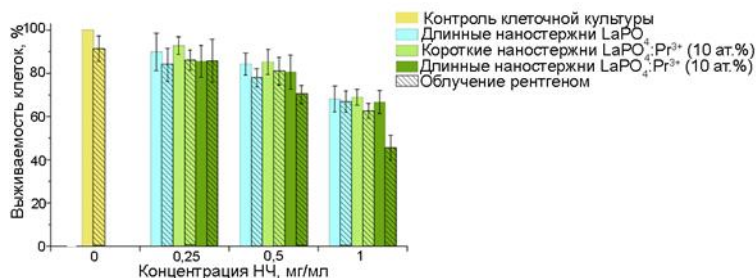


Рис. 2. Влияние на жизнеспособность клеток L-929 коллоидных НЧ с разными концентрациями (не заштрихованные столбики) и влияние тех же НЧ при дополнительном воздействии рентгеновским излучением (заштрихованные столбики).

Автор выражает благодарность д.ф.-м.н. Орловскому Ю.В. и д.ф.-м.н. Махову В.Н. за постановку научной задачи и обсуждение результатов, Орловской Е.О. за консультации по синтезу НЧ, к.ф.-м.н. Батыгову С.Х. и к.ф.-м.н. Попову А.В. за помощь в измерениях рентгенолюминесценции, к.х.н. Исхаковой Л.Д. за проведение энергодисперсионного анализа, д.м.н. Пятаеву Н.А. за организацию *in vitro* исследований.



**Дифференциальная диагностика  
плоскоклеточной карциномы кожи *in vitro*  
методом спектроскопии комбинационного рассеяния света**

**Шельгина С.Н.<sup>1</sup>, Римская Е.Н.<sup>1</sup>, Сараева И.Н.<sup>1</sup>, Тимурзиева А.Б.<sup>2</sup>**

1- Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

2- Национальный НИИ общественного здоровья имени Н.А. Семашко, Москва

E-mail: [shelyginasn@lebedev.ru](mailto:shelyginasn@lebedev.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-216-217

Плоскоклеточная карцинома кожи (ПКК) — злокачественная опухоль эпидермальных кератиноцитов, распространяющихся в дерму, является одним из наиболее распространённых типов немеланоцитарных злокачественных заболеваний кожи. При условии своевременного обнаружения и адекватного лечения показатель пятилетней выживаемости пациентов с ПКК составляет ~90 %. Поздние стадии развития заболевания, увеличение зоны поражения и инвазия за пределы кожных структур связаны с высокой смертностью [1]. В виду этого разработка методов ранней неинвазивной диагностики злокачественных новообразований кожи является актуальной задачей. Таким методом может быть спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света, являющаяся структурно чувствительным оптическим методом, позволяющим проводить неинвазивный анализ биомаркеров в тканях различных органов [2].

В настоящей работе показана возможность дифференциации ПКК методом конфокальной сканирующей КР спектроскопии с длинами волн возбуждения 532 и 785 нм *in vitro*. Были проанализированы спектры от 15 образцов ПКК, 17 образцов нормальной кожи, полученные в диапазоне 900–3100 см<sup>-1</sup>. Вклад флуоресценции был вычтен из исходных спектров с помощью алгоритма Ванкувера, оптимального для биообразцов, затем спектры сглаживались по методу Савицкого-Голея и нормировались на интенсивность полосы 1442 см<sup>-1</sup>, являющейся наиболее стабильной и независимой от конформации и используемой как стандарт интенсивности. Полученные спектры для длин волн возбуждения 532 и 785 нм представлены на рис. 1а, 1б.

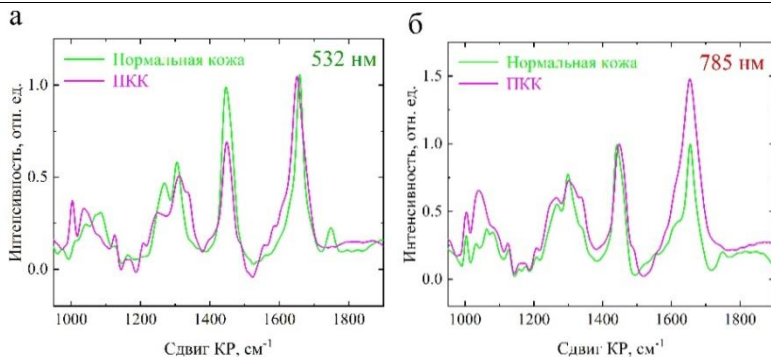


Рис. 1. Обработанные спектры КР ПКС и нормальной кожи при длине волны возбуждения 532 (а) и 785 нм (б).

Были выявлены различия в спектральных данных ПКС и нормальной кожи. Это позволило нам предложить спектральные критерии отношения интенсивностей спектральных полос КР, относящихся к различным колебаниям липидов клеточных мембран. Данные критерии позволили дифференцировать здоровую кожу от плоскоклеточной карциномы с чувствительностью и специфичностью более 90 %, что демонстрирует высокую клиническую значимость метода в дифференциальной диагностике заболеваний кожи.

Соблюдение этических стандартов. Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией и одобрено Межвузовским этическим комитетом МГМСУ им. Евдокимова Минздрава России (Москва, Россия, код протокола 3, 16.03.2023) для исследований на человеке. Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 23-25-00249.

1. Clayman G.L., Lee J.J., Holsinger F.C. et al., J. Clin. Oncol. 2005, **23**, 759–765.
2. Zhang J., Fan Y., Song Y. et al., Medicine. 2018, **97**, e12022.

## РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА

### Характеристики шумового поля ветрового волнения в мелководном неоднородном волноводе в области перехода от акустически мягкого к жёсткому дну

**Боджона С.Д.<sup>1,2</sup>, Сидоров Д.Д.<sup>1</sup>, Луньков А.А.<sup>1,2</sup>**

1- *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва*

2- *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

E-mail: [devibodjona@yandex.ru](mailto:devibodjona@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-218-220

В настоящее время наблюдается рост темпов освоения морских нефтегазовых месторождений [1]. Особый интерес представляют арктические моря, стремительно освобождающиеся ото льда [2]. По результатам 3-D сейсморазведки в прибрежной мелководной области Карского моря на площади более 700 км<sup>2</sup> [3] выявлена сильная неоднородность донного слоя, характеризующаяся наличием водоподобных участков, в которых скорость звука в дне близка к скорости звука в воде. В данной работе рассматриваются особенности формирования шумового поля распределенных источников шума, обусловленные ветровым волнением, в рамках идеализированной модели волновода с неоднородным по трассе дном.

Для численного моделирования шумового поля ветрового волнения используется модель из монографии [4]. Задаётся интенсивность приповерхностных источников шума (около 50 дБ отн. 1 мкПа), находящихся на глубине 1/4 длины волны, частота  $f=500$  Гц, произвольная фаза и расположение (на расстоянии 1 м друг от друга по всем направлениям). В центре шумовой области расположена приемная акустическая система, состоящая из 28 гидрофонов, удалённых на 1 м друг от друга. Расчёты проводились для неоднородного волновода, включающего зону шириной 2000 м постепенного перехода скорости звука в дне от 1400 м/с до 1600 м/с между двумя однородными регионами (рис. 1). Скорость звука в воде  $c_w=1470$  м/с, плотность водного слоя  $\rho_w=1000$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_b=1850$  кг/м<sup>3</sup> и коэффициент затухания в дне  $\alpha_b=0,33$  дБ/л принимались постоянными. Радиус области, где находятся шумовые источники,

составляет 5 км. Поле шумовых источников вычислялось методом широкоугольного параболического уравнения.

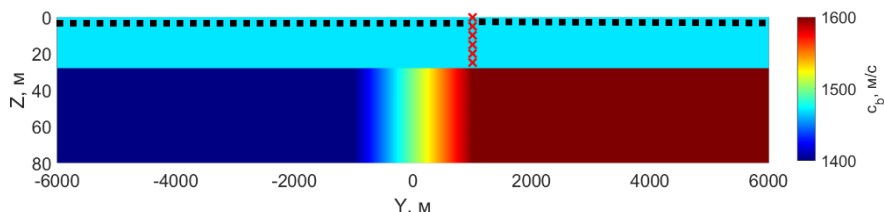


Рис. 1. Модель неоднородного волновода (вид сбоку).

Красными крестиками обозначена антенна (возможное положение), а чёрными квадратиками шумовые источники.

По итогам моделирования были получены пространственные характеристики шума. Нормированные вертикальные диаграммы направленности в неоднородном волноводе на рис. 2а. демонстрируют плавный рост вклада дальних шумовых источников с увеличением скорости звука в дне. Кроме того, на рис. 2б. подчёркивается слабая анизотропия шума в горизонтальной плоскости (максимальное отклонение от минимума для каждой области не превышает 3 дБ).

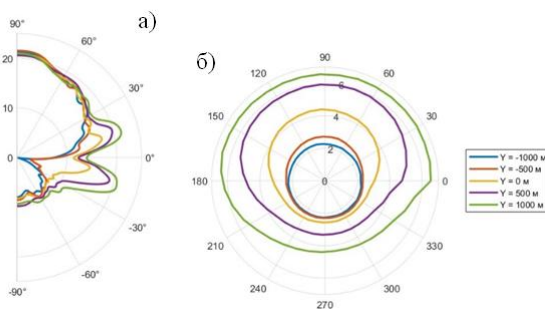


Рис. 2. Нормированные вертикальные (а) и горизонтальные (б) диаграммы направленности шума для 5 положений приёмной антенны в неоднородном волноводе.

Таблица 1. Средняя интенсивность при разных положениях антенны

| Координата расположения антенны по Y, м | -1000 | -500 | 0    | 500  | 1000 |
|-----------------------------------------|-------|------|------|------|------|
| Средняя суммарная интенсивность, дБ     | 52,3  | 52,5 | 53,3 | 54,6 | 55,8 |

Обнаружено, что в случае расположения антенны на границе переходной области и региона с акустически жёстким дном средний уровень шума на 3,5 дБ больше, чем при её размещении на границе с акустически мягким дном (таблица 1).

Результаты исследования позволили установить зависимость пространственных характеристик шума ветрового волнения от свойств дна в мелком море с неоднородной донной структурой. Полученные закономерности могут быть полезными при проектировании систем звукоподводной связи в мелководных регионах с сильными неоднородностями в структуре донных осадков как, например, на арктическом шельфе.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-72-10121, <https://rscf.ru/project/22-72-10121/>.

1. Малащенко Б.М., Акчурин Л.И., Вестн. Моск. ун-та. 2015, **132**(2), 49–64.
2. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А. и др., Исследование земли из космоса. 2013, **4**, 50–65.
3. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г. и др., Акустический журнал. 2018, **64**(3), 342–358.
4. Carey W.M., Evans R.B. Ocean ambient noise: measurement and theory, Springer Science & Business Media, 2011.

## Особенности измерения групповой скорости продольных ультразвуковых волн в тонких стальных конструкциях

Макалкин Д.И.<sup>1,2</sup>

1- Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

2- МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

E-mail: [dmitrymakalkin@yandex.ru](mailto:dmitrymakalkin@yandex.ru)

DOI: 10.24412/cl-35673-2024-1-221-223

Ультразвуковая тензометрия является одним из основных и удобных методов определения действующих и остаточных механических напряжений неразрушающим образом с помощью акустоупругого эффекта, для которого требуется высокая точность измерения скорости звука [1]. Современным государственным первичным эталоном измерения скорости ультразвука (УЗ) в твёрдых средах является ГЭТ 189-2014 [2], в котором УЗ возбуждается лазером термооптически [3] при освещении поверхности образца, а приём УЗ осуществляется с помощью лазерного интерферометра с противоположной стороны образца. Недостатками эталона являются теневой режим приёма УЗ, риск абляции поверхности, температурные искажения скорости звука, а также ограниченность методики для образцов тоньше 2 мм. В данной работе сообщается об альтернативном методе измерения групповой скорости продольных УЗ волн с высокой точностью, лишённом перечисленных недостатков эталона.

Предлагаемый метод так же использует термооптическое возбуждение УЗ коротким лазерным импульсом (10 нс), однако возбуждение УЗ-импульса происходит в особом оптико-акустическом преобразователе, излучающем УЗ в образец, а прием происходит с помощью широкополосного пьезопреобразователя в эхо-режиме.

Был проведен эксперимент по измерению групповой скорости продольных УЗ-волн в тонких стальных плоскопараллельных образцах толщиной 1,0 и 1,9 мм. Чтобы исключить наложение НЧ-гармоник соседних отражений, а также ВЧ-шумы, обусловленные ограниченностью полосы приёма пьезопреобразователя и электрическими наводками, к сигналу был применён полосовой цифровой фильтр 5–24 МГц. На рис. 1 показан вид отфильтрованного

сигнала для образца толщиной 1 мм. Групповая скорость продольных УЗ-волн измерялась времяпролетным методом по разным комбинациям отражений, в результате чего было получено распределение частоты выпадения определенного значения скорости (гистограмма на рис. 2), по которому вычисляется среднее значение скорости. Примечательным является «нормальный» вид распределения, что свидетельствует о частично случайном характере измеренной величины и обосновывает данный принцип расчета среднего значения. Дисперсия групповой скорости для образца толщиной 1 мм равна  $\pm 0,14 \%$ , а для образца толщиной 1,9 мм —  $\pm 0,3 \%$ .

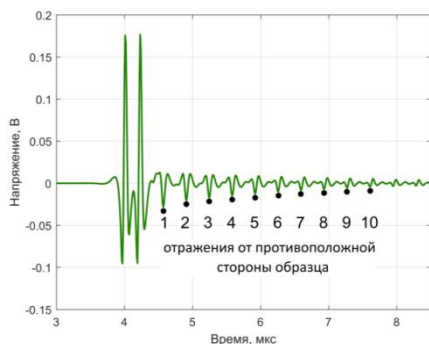


Рис. 1. Отражения в сигнале (полоса 5–24 МГц, образец толщиной 1 мм).

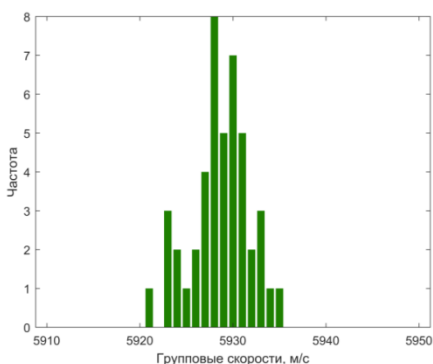


Рис. 2. Гистограмма групповой скорости для образца толщиной 1 мм.

Поскольку УЗ-импульс распространяется в виде УЗ-пучка ограниченного поперечного сечения, то он дифрагирует на всём пути распространения. В прошлой работе [4] рассматривалось влияние дифракции внутри толстых образцов, но в случае тонких образцов необходимо в первую очередь учитывать дифракцию внутри акустического тракта, принимающего УЗ. Для компенсации дифракции внутри образцов была произведена деконволюция сигнала с измеренной импульсной переходной характеристикой приёмного преобразователя, что существенно уменьшило дисперсию: у образца с толщиной 1 мм она снизилась до  $\pm 0,12 \%$ , а для 1,9 мм — до  $\pm 0,10 \%$ . Такая малая дисперсия измеренной групповой скорости должна позволить использовать акустоупругий эффект для расчёта

механических напряжений с высокой точностью даже для плоскопараллельных деталей с толщиной до 1 мм.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Карабутову А.А. и к.ф.-м.н. Саватеевой Е.В. за постановку научной задачи и помощь в данном исследовании.

1. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972.
2. Базылев П.В., Доронин И.С., Кондратьев А.И. и др. Измерительная техника. 2016, **5**, 5–10.
3. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991.
4. Макалкин Д.И., Карабутов А.А., Саватеева Е.В. Акустический журнал. 2023, **69**(6), 1–10.



## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

|                       |                       |                                             |                  |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------------|------------------|
| Braud A. ....         | 88                    | Вельмискин В.В. ....                        | 17, 29           |
| Camy P. ....          | 88                    | Волкова В.В. ....                           | 83               |
| Loiko P. ....         | 88                    | Волчек А.А. ....                            | <b>91</b>        |
| Veselský K. ....      | 88                    | Волчков И.С. 72, <b>93</b> , 124, 129, 139, |                  |
| Айыыжы К.О. ....      | <b>8</b>              | 142                                         |                  |
| Александров А.А. .... | 91, 137               | Гадеева А.А. ....                           | 207              |
| Алексеева А.С. ....   | 207                   | Галимзянов Б.Н. ....                        | 86               |
| Алешкина С.С. ....    | 17                    | Гаянова Т.Э. ....                           | <b>149</b>       |
| Алышев С.В. ....      | 17                    | Гритченко А.С. ....                         | 204              |
| Анашкина Е.А. ....    | 35                    | Губина К.А. ....                            | <b>96</b>        |
| Андреев С.Е. ....     | 162, 165              | Гудкова В.В. ....                           | 156              |
| Андрианов А.В. ....   | 35                    | Давыдов Д.А. ....                           | <b>17</b>        |
| Анохин Е.В. ....      | 188                   | Дегтярев К.Н. ....                          | <b>152</b>       |
| Антипов Д.А. ....     | <b>10</b>             | Деева О.К. ....                             | 210              |
| Арискин А.О. ....     | <b>12</b>             | Демина В.А. ....                            | 188              |
| Ашихмин А.А. ....     | 169                   | Диденко Я.С. ....                           | <b>99</b> , 108  |
| Бакаева А.В. ....     | 88                    | Долуденко И.М. ....                         | 72, 139, 142     |
| Бакиров А.В. ....     | 188                   | Евдокимов А.А. ....                         | <b>102</b>       |
| Баранов Д.Д. ....     | 54                    | Елопов А.В. ....                            | <b>20</b>        |
| Бармина Е.В. ....     | 8                     | Ермакова Ю.А. ....                          | 137              |
| Башлыков Н.А. ....    | 129                   | Жамков А.М. ....                            | 12               |
| Беляков Н.А. ....     | <b>167</b>            | Жарков М.Н. ....                            | 213              |
| Бобров В.С. ....      | 207                   | Живетьев К.В. ....                          | 75               |
| Богачев Н.Н. ....     | 162                   | Жуков В.И. ....                             | 156, 162         |
| Боджона С.Д. ....     | <b>218</b>            | Журавлев М.В. ....                          | 207              |
| Болдырев К.Н. ....    | 134                   | Журавлев С.Г. ....                          | 48               |
| Борзосеков В.Д. ....  | 156                   | Журкин В.С. ....                            | <b>66</b>        |
| Бородкин А.В. ....    | 201                   | Захаров Д.М. ....                           | <b>105</b>       |
| Бруславский И.О. .... | 10                    | Зверев А.Д. ....                            | <b>23</b>        |
| Бузаева Е.М. ....     | <b>15</b>             | Зимин Е.Э. ....                             | 207              |
| Букреева Е.А. ....    | 210                   | Зими́на Ю.И. ....                           | 99, <b>108</b>   |
| Буралкин М.В. ....    | 15                    | Иванькова Ю.И. ....                         | <b>172</b>       |
| Бурмистров Д.Е. ....  | 156                   | Казанцева Д.В. ....                         | <b>175</b> , 198 |
| Бутенков Д.А. ....    | <b>88</b> , 134       | Калмыков А.С. ....                          | 204              |
| Василенкова А.М. .... | 88                    | Калягина Н.А. ....                          | 201              |
| Васимов Д.Д. ....     | 111, <b>169</b> , 188 | Камынин В.А. ....                           | 23, 60, 63       |

|                       |                     |                         |                            |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| Касьяник Н.И. ....    | 26                  | Москалев А.С. ....      | 201                        |
| Катиков В.А. ....     | 42                  | Муратов Д.А. ....       | 120                        |
| Киселев Г.Б. ....     | 155                 | Нагаев Е.И. ....        | 191, <b>194</b>            |
| Ковалец Н.П. ....     | 124                 | Некрасов И.К. ....      | <b>122</b>                 |
| Козак А.К. ....       | 149                 | Нехаева П.А. ....       | 69                         |
| Козлова Л.Ю. ....     | <b>111, 178</b>     | Новиков В.С. ...        | 111, 169, 178, 183,<br>188 |
| Коледов М.А. ....     | <b>69</b>           | Нугаев И.Р. ....        | 165                        |
| Комаров Б.Е. ....     | <b>114</b>          | Образцова Е.А. ....     | 149                        |
| Комиссаров Д.Г. ....  | <b>29</b>           | Орлов А.В. ....         | 167                        |
| Кончеков Е.М. ....    | <b>156</b>          | Осянин Д.Н. ....        | 158, <b>160</b>            |
| Конькова А.С. ....    | 156                 | Павлов О.О. ....        | <b>196</b>                 |
| Кочуков Ю.А. ....     | 96                  | Павлов С.К. ....        | 99, 108                    |
| Кошелев И.О. ....     | <b>72, 124, 129</b> | Панов Д.В. ....         | <b>124</b>                 |
| Красновская К.А. .... | 23                  | Паращук Н.С. ....       | <b>127</b>                 |
| Кривецкая А.А. ....   | <b>181</b>          | Пасхин М.О. ....        | 175, <b>198</b>            |
| Крылов Ю.М. ....      | <b>158</b>          | Персидская О.К. ....    | 185                        |
| Кузнецов С.М. ....    | <b>183, 188</b>     | Пиняев С.И. ....        | 213                        |
| Кукаркина С.Э. ....   | 207                 | Подкур П.Л. ....        | 72, 124, <b>129</b>        |
| Кулагина М.А. ....    | 83                  | Пустовалов А.В. ....    | <b>120</b>                 |
| Кулешова К.В. ....    | 108                 | Резаева А.Д. ....       | 149                        |
| Кустов Д.М. ....      | 181                 | Римская Е.Н. ....       | 216                        |
| Кучеров Р.Н. ....     | <b>117</b>          | Рогачевская А.В. ....   | <b>40</b>                  |
| Лаптинская П.К. ....  | 57, 183, <b>185</b> | Романишкин И.Д. ....    | 181                        |
| Ларина Н.А. ....      | 15                  | Рощин И.А. ....         | <b>201</b>                 |
| Лихов В.В. ....       | <b>32</b>           | Рунина К.И. ....        | 88, 134                    |
| Луканин В.И. ....     | 156                 | Сагитова Ф.Р. ....      | 122                        |
| Луньков А.А. ....     | 218                 | Сараева И.Н. ....       | 216                        |
| Лысухин Д.Д. ....     | 196                 | Сафонова А.М. ....      | <b>204</b>                 |
| Любимовский С.О. .... | 178, <b>188</b>     | Сафронов Т.И. ....      | <b>42</b>                  |
| Макалкин Д.И. ....    | <b>221</b>          | Седов В.С. ....         | 137                        |
| Марисова М.П. ....    | <b>35</b>           | Седуш Н.Г. ....         | 178, 188                   |
| Мартьянов А.К. ....   | 137                 | Семиренченков А.А. .... | <b>45</b>                  |
| Матвеева Т.А. ....    | 191, 194            | Сидоров Д.Д. ....       | 218                        |
| Менделеев Д.И. ....   | 111                 | Соколов А.С. ....       | 149                        |
| Миронов С.А. ....     | <b>75</b>           | Степин В.П. ....        | <b>162</b>                 |
| Михайлов Е.К. ....    | <b>37</b>           | Сторожевых М.С. ....    | 75                         |
| Молькова Е.А. ....    | <b>191</b>          | Тагиров Р.Р. ....       | <b>78</b>                  |
| Моряков И.В. ....     | 156                 |                         |                            |

|                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| Танякин Д.А. ....      | 15                  |
| Таперо М.К. ....       | <b>132</b>          |
| Таратынова А.Д. ....   | 207                 |
| Терентьев А. ....      | 75                  |
| Терехова А.Б. ....     | <b>134</b>          |
| Терещенко Д.П. ....    | 96                  |
| Тимакова С.И. ....     | 57                  |
| Тимофеева Е.Э. ....    | <b>80</b>           |
| Тимохин А.С. ....      | <b>48</b>           |
| Тимурзиева А.Б. ....   | 216                 |
| Титов А.И. ....        | 99, 108             |
| Трикшнев А.И. ....     | 63                  |
| Тяжелов И.А. ....      | <b>137</b>          |
| Уденев А.М. ....       | 201                 |
| Улыбышев Д.А. ....     | <b>139</b>          |
| Усачёнок М.С. ....     | 162                 |
| Ушаков А.А. ....       | 10                  |
| Федорова И.А. ....     | 158                 |
| Филатов В.В. ....      | <b>83</b>           |
| Фомичев О.В. ....      | <b>165</b>          |
| Хайретдинова Д.Р. .... | 72, 139, <b>142</b> |
| Харитонов П.Д. ....    | <b>51</b>           |

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| Харлачев Д.Е. ....     | 165           |
| Хрущалина С.А. ....    | <b>207</b>    |
| Худов А.В. ....        | <b>54</b>     |
| Худяков Д.В. ....      | 45            |
| Хуторская И.А. ....    | 213           |
| Цыганков А.А. ....     | <b>86</b>     |
| Чекулаев И.С. ....     | <b>146</b>    |
| Чередова Д.И. ....     | 57, 185       |
| Чернобай Р.А. ....     | 213           |
| Черных И.Н. ....       | 102           |
| Чижов П.А. ....        | 10            |
| Чиркова Я.Д. ....      | <b>210</b>    |
| Шайдулин А.Т. ....     | <b>213</b>    |
| Шелыгина С.Н. ....     | <b>216</b>    |
| Шемахин А.Ю. ....      | 155           |
| Ширманкин Андр.В. .... | 37, <b>60</b> |
| Ширманкин Ант.В. ....  | <b>63</b>     |
| Ширшин Е.А. ....       | 196           |
| Шляпкина В.И. ....     | 207           |
| Шумейко С.А. ....      | 175, 198      |
| Якимов Б.П. ....       | 196           |
| Якобсон Д.Э. ....      | 213           |

## ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ



**ИОФ РАН**

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики  
им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук»



Министерство  
науки и высшего образования  
Российской Федерации

# ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ «ПРОХОРОВСКИЕ НЕДЕЛИ»

## ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

*Печатается в авторской редакции  
в соответствии с представленным оригинал-макетом*

*Дизайн обложки М.Н. Маяковой  
Редколлегия: В.В. Глушков, М.Я. Гришин, А.В. Кулебякин,  
Д.В. Поминова, И.Д. Романишкин  
Технический редактор В.Е. Шушкин*

Свёрстано 06.09.2024  
Подписано в печать 12.09.2024  
Формат 60×90  $\frac{1}{16}$ . Усл. печ. л. 14,25.  
Тираж 100 экз. Заказ № ПН-2024.  
Отпечатано в ООО «МДМпринт»  
г. Москва, тел.+7(495) 256-10-00

ISBN 978-5-905109-12-6



ISBN 978-5-905109-12-6



9 785905 109126