

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук



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

**ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

**19 – 21 октября 2021 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**

**19–21 октября 2021 г.**  
**Москва**

УДК 53; 535; 537; 538,9

**Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели».** 19–21 октября 2021 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, 2021. — 150 с.

**ISBN 978-5-905 109-07-2**

В сборник включены тексты подготовленных молодыми учёными докладов, представленных на школе-конференции молодых учёных Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН) «Прохоровские недели», время проведения — 19–21 октября 2021 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 № 075-15-2020-912 от 13 ноября 2020 г.).

### **Председатель конференции:**

В.В. Глушков, д.ф.-м.н., доцент (ИОФ РАН).

### **Оргкомитет:**

С.В. Демишев, д.ф.-м.н., профессор,	М.Н. Маякова, к.х.н.
М.Я. Гришин	Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.
Е.Э. Дунаева, к.т.н.	И.Д. Романишкин
Е.В. Захарова	В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н.
А.В. Кулебякин, к.т.н.	

### **Программный комитет:**

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

С.В. Демишев, д.ф.-м.н., профессор,	Д.В. Поминова, к.ф.-м.н.
Е.Э. Дунаева, к.т.н.,	С.А. Филатова, к.ф.-м.н.
А.В. Кулебякин, к.т.н.	В.Е. Шукшин, к.ф.-м.н.

Время проведения конференции — 19–21 октября 2021 г.

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

<https://www.gpi.ru/sci/conferences/youngconf/2021/>

© Коллектив авторов, 2021

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

## Содержание

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА .....	7
Генерация одной продольной моды в дисковом Nd:YVO <sub>4</sub> лазере с трёхпучковой накачкой и вырожденным резонатором М-типа.....	7
Лазерное зондирование многослойных туманов лидаром с безопасным для глаз уровнем излучения.....	10
Генерация ультракоротких импульсов на основе нелинейного вращения плоскости поляризации в гантелевидном эрбиевом волоконном лазере...	13
Прямая лазерная печать графена с ростовой подложки .....	16
Создание спиральных волноводов в кварцевом стекле методом прямой фемтосекундной лазерной записи.....	19
Эволюция распределения наночастиц золота по размерам под действием лазерного излучения.....	22
Исследование динамики генерации ВКР-лазера на кристалле BaWO <sub>4</sub> с комбинированным сдвигом частоты (925+332 см <sup>-1</sup> ) при синхронной пикосекундной накачке.....	25
Исследование гомологического ряда нормальных спиртов методами спектроскопии комбинационного рассеяния света .....	28
КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД .....	31
Деформационные расщепления в SiV-центрах окраски алмаза: влияние отжига на динамику .....	31
Анизотропия рассеяния носителей заряда в антиферромагнетиках RB <sub>12</sub> (R=Ho, Er, Tm).....	34
Эволюция спектров комбинационного рассеяния поливинилхлорида, подвергнутого фото- и термовоздействиям .....	36
Исследование водных растворов гликолей методом спектроскопии комбинационного рассеяния .....	39
Управление зарядовым состоянием центров окраски в алмазах с помощью рентгеновского излучения .....	42
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И НАНОСТРУКТУРЫ.....	45
Широкодиапазонная спектроскопия монокристалла гибридного перовскита MAPbBr <sub>3</sub> .....	45
Спектроскопия липидных мембран с магнитными наночастицами CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .....	48
Исследование структуры и физических свойств электроформованных	

мембран .....	51
Интерференция Фано в нелегированных наноалмазах, терминированных водородом.....	53
Выращивание алмазных композитов в СВЧ плазме для визуализации жёсткого рентгеновского излучения.....	56
Проводимость и термоэлектрические коэффициенты допированного титаната стронция при высоких температурах.....	58
Оптические свойства 3-А графеновых нанополосок.....	61
Инженерия центров окраски германий-вакансия в алмазе.....	63
Исследование насыщаемого поглощения в тонких пленках MXene.....	65
Исследование аномальной двуосности в монокристаллах шеелитов в зависимости от способа их получения из расплава .....	68
Влияние термообработки на структуру и механические свойства кристаллов диоксида циркония, частично стабилизированных оксидом гадолиния .....	71
<b>ФИЗИКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>73</b>
Полигональные фотонные паттерны в гармонической ловушке в брэгговском микрорезонаторе .....	73
Андреевские состояния и ток в многотерминальном джозефсоновском контакте.....	76
<b>ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>78</b>
Квазианалитическая модель динамики ионных пучков в нейтральном газе и электрических полях.....	78
Частотная зависимость формы завершеного скользящего разряда.....	79
Исследование синтеза катализаторов платиновой группы в мощном микроволновом разряде гиротрона.....	82
Особенности анализа микрофотографий образцов, полученных в результате инициации СВЧ разрядов в смесях порошков .....	83
Модификация поверхности пластин тантала в разряде, инициируемом микроволновым излучением гиротрона в порошке реголита .....	86
Вейвлет-анализ низкочастотных флуктуаций плотности плазмы при многоимпульсном ЭЦР нагреве в стеллараторе Л-2М .....	89
Анализ наработки долгоживущих активных форм кислорода и азота в водных растворах под действием прямого пьезоразряда.....	92
Синтез оксидных, нитридных и оксинитридных материалов микро- и	

наноразмеров на основе порошков Al/AlN, Al/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в разрядах, иницированных излучением мощного гиротрона.....	94
<b>ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ.....</b>	<b>97</b>
Высококочувствительная иммуноаналитическая платформа на основе функционализированных магнитных наночастиц для количественной детекции внеклеточных везикул .....	97
Исследование цитотоксичности наночастиц оксидов металлов (ZnO, Ag <sub>2</sub> O), синтезированных методом лазерной абляции.....	100
Лазерная масс-спектрометрия летучих органических соединений мочи детей с врождёнными уропатиями.....	103
Влияние фторполимерной пленки, модифицированной наноразмерным фотолуминофором, на рост и развитие растений.....	106
Лазерная скаттерометрия жирности молока .....	109
Исследование эффективности фотодинамической терапии по времени жизни флуоресценции хлорина еб.....	111
Лазерно-индуцированная десорбция/ионизация на поверхности оксида молибдена для определения пестицида тетраметилтиурамдисульфида .	113
Классификация белковых (пептидных) лигандов никотиновых ацетилхолиновых рецепторов с использованием рамановской спектроскопии и метода главных компонент .....	116
Влияние длины сопряжения, структуры боковых и концевых групп, типа изомера на спектры комбинационного рассеяния каротиноидов .....	119
Детектирование триметиламинамин оксида в плазме крови человека с помощью планарных ГКР-структур .....	122
Использование коэффициента асимметрии для автоматической оценки кальциевых ответов клеток .....	124
Исследование сходимости алгоритма дифференциальной эволюции при моделировании оптического отклика фотосинтетических пигмент-белковых комплексов .....	127
<b>РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА.....</b>	<b>130</b>
Распространение звука в магнитных жидкостях вблизи температуры стеклования дисперсионной среды.....	130
Моделирование трёхмерной структуры звукового поля на арктическом шельфе с неоднородным дном.....	132
<b>ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ.....</b>	<b>135</b>
Сравнение результатов измерения уровней сульфатов в атмосферном воздухе при использовании фильтров различных типов .....	135

О необходимости развития методических и методологических подходов при определении содержания никеля в атмосферном воздухе на территории РФ. ....	137
Анализ представленных СЕИР данных изменения уровня общей эмиссии свинца .....	138
Анализ возможности совместного выполнения наблюдений на станциях международных программ и станциях национальной сети комплексного фоновый мониторинга на территории РФ .....	141
Содержание нефтепродуктов в почве как обязательный параметр анализа для обследования территорий при организации станций комплексного фоновый мониторинга .....	144
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ УЧАСТНИКОВ .....	147

# ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

## Генерация одной продольной моды в дисковом Nd:YVO<sub>4</sub> лазере с трёхпучковой накачкой и вырожденным резонатором М-типа

**Гурьев Д.А.**

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

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

DOI: 10.24412/cl-35673-2021-1-7-9

Лазеры с вырожденным резонатором способны генерировать излучение в узком спектральном диапазоне, соответствующем ширине одной продольной моды [1, 2]. Но в работах, посвящённых спектральным особенностям таких резонаторов, используется однопучковая накачка. Особенности распространения излучения в таких резонаторах позволяют эффективно использовать его и при трёхпучковой накачке [3], тем самым существенно повышая мощность выходного излучения при сохранении хорошего качества выходного пучка.

Целью данной работы было получение режима генерации одной продольной моды в дисковом лазере с трёхпучковой накачкой и вырожденным резонатором М-типа, имеющим два направления генерации, а также — определение выходных характеристик излучения.

В качестве активного элемента использовался диск Nd:YVO<sub>4</sub> толщиной 0.5 мм. Накачка активного элемента осуществлялась тремя непрерывными лазерными диодами с волоконным выходом (диаметр сердцевинки волокна 105 мкм) на длине волны 808 нм. Таким образом, в активном элементе было создано три области инверсной населенности, которые находились на одной вертикальной линии и отстояли друг от друга на расстоянии 7.4 мм. Диаметры пятен накачки в активном элементе составили 0.3, 0.4 и 0.4 мм.

Резонатор был образован двумя зеркалами, одно из которых было нанесено на заднюю поверхность активного элемента. Второе — сферическое ( $R = 200$  мм), было разделено на две области. На одну область этого зеркала было нанесено высокоотражающее



покрытие на длине волны генерации, на другую – покрытие с коэффициентом отражения 90 %. Расстояние между зеркалами составляло 100 мм. На оптической оси резонатора было установлено непрозрачное препятствие для предотвращения возникновения генерации вдоль оси резонатора, проходящей через среднее пятно накачки (пятно 2 – на рис. 1). Таким образом излучение в резонаторе могло распространяться только по внеосевой М-образной траектории.

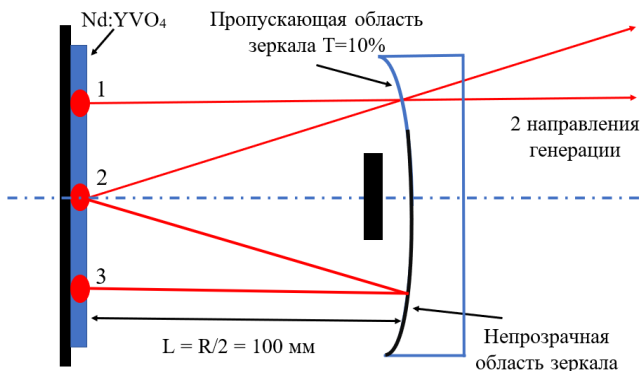


Рис. 1. Схема вырожденного резонатора М-типа.  
1, 2, 3 — пятна накачки на активном элементе.

Исследования параметров выходного излучения показали, что оба пучка имели одинаковые характеристики: мощность, расходимость и спектр. При максимальной поглощённой мощности накачки 10 Вт, мощность генерации составила 1.35 Вт суммарно с двух каналов генерации, полная расходимость по уровню интенсивности 0.5 составила 2.2 мрад. Увеличение мощности накачки практически не влияло на расходимость излучения.

Определение спектральных характеристик осуществлялось с помощью интерферометра Фабри — Перо. В работе использовались эталоны Фабри — Перо с разной базой: 1.18, 3.3, 15 и 40 мм. Полученные интерферограммы представлены на рис. 2. Их анализ показал, что лазер работает в режиме генерации одной продольной моды. Ширина спектра генерации составила  $6.88 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  (при межмодовом интервале  $12.5 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ ) Также было установлено, что режим генерации одной продольной моды реализуется при суммарной поглощённой мощности накачки до 10 Вт.

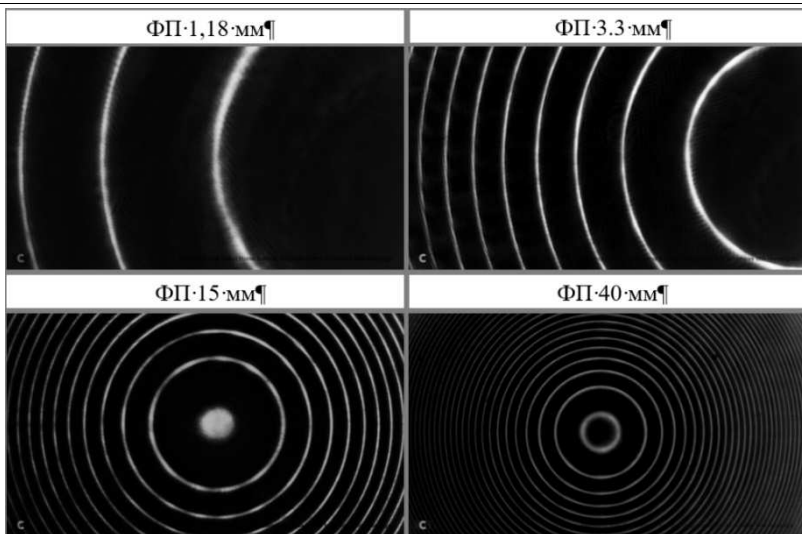


Рис. 2. Интерферограммы выходного излучения при поглощённой мощности накачки 10 Вт, полученные с помощью эталонов Фабри — Перо с разной базой.

В данной работе впервые была продемонстрирована генерация одной продольной моды в лазере с трёхпучковой накачкой и вырожденным резонатором М-типа. Данный лазерный источник имеет два одинаковых выходных пучка генерации с хорошим качеством излучения. Благодаря своим характеристикам данный источник, может найти применение в интерферометрии, спектроскопии и для генерации оптических гармоник.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Цветкову В.Б. и к.ф.-м.н. Николаеву Д.А. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90248.

1. Chen Y.F., Jiang C.H., Lan Y.P., Huang K.F. Phys. Rev. A. 2004, **69**, 053807.
2. Chen C.H., Huang P.Y., Kuo C.W. J. Opt. 2010, **12**, 015708.
3. Bul'kanov A.M., Nikolaev D.A., Tsvetkov V.B., Shamatova A.I., Shcherbakov I.A. Quantum Electronics. 2018, **48**, 468–471.

## Лазерное зондирование многослойных туманов лидаром с безопасным для глаз уровнем излучения

**Завозин В.А., Гришин М.Я.**

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

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

DOI:10.24412/c1-35673-2021-1-10-12

Дистанционное зондирование рассеивающих сред — туманов, облаков, шлейфов дыма, — является весьма важной задачей, в частности, для гражданских и военных приложений: для навигации в условиях сильных туманов, в дымовых завесах. Особый интерес представляет зондирование многослойных рассеивающих объектов: ярусы облаков, крона деревьев, последовательные дымовые шлейфы или туманы. Известно [1], что для решения этих задач используются лидары на основе мощных лазеров. При этом, основным ограничением использования лидаров является опасность поражения органов зрения (порог плотности энергии излучения для импульсов видимого диапазона  $<1$  мкДж/см<sup>2</sup>). Несомненно, что разработка лидарных систем с безопасным для глаз уровнем излучения для зондирования в режиме счёта фотонов на протяжённых трассах является перспективной задачей.

Недавно [2] в нашей лаборатории был разработан уникальный, не имеющий аналогов компактный (масса ~400 г) лидар обратного рассеяния. Прибор собран на диодном GaAs-лазере с безопасным для глаз уровнем излучения ( $<1$  мкДж/см<sup>2</sup>) и большой частотой (до 10 кГц) повторения импульсов с рекордно короткой длительностью (~3 нс) [2] при накачке импульсами тока. В качестве приёмника использовали стробируемый кремниевый лавинный фотодиод, который работал в режиме счёта фотонов. С помощью этого лидара была исследована эволюция многослойных туманов с перемещением фронта. Зондирование аэрозолей проводили в наклонном тоннеле сцинтилляционного телескопа *Баксанской нейтринной обсерватории* (БНО) [3] (рис. 1, длина трассы 50 м).

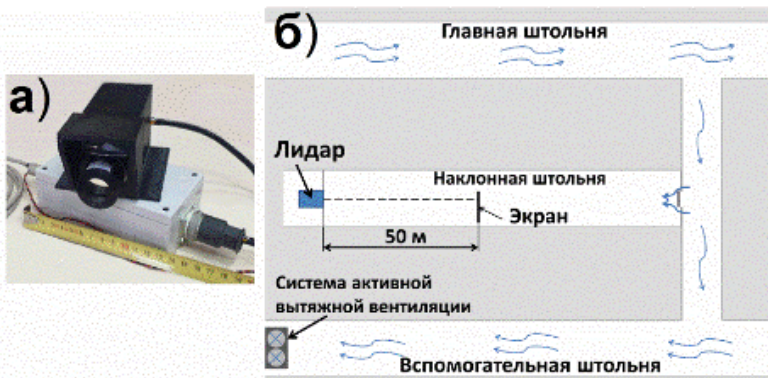


Рис. 1. а) фото приёмо-передающего блока (чёрного цвета) лидара и интерфейсный блок (светлого фона); б) – схема расположения лидара в тоннеле БНО около сквнтилляционного телескопа.

Лидар был установлен в верхней части тоннеля, примерно через 50 м от прибора находился плоский экран-мишень. Измерения проводились в автоматическом режиме, каждые 30 минут запускался сеанс измерения, и данные отправлялись в лабораторию посредством сети интернет. На рис. 2 представлен пример гистограммы обратного рассеяния. В одном из сеансов измерений (15.07.2019, в 11:54) была обнаружена структура многослойного облака-тумана, фронт которого остановился на отметке 7–8 м до лидара.

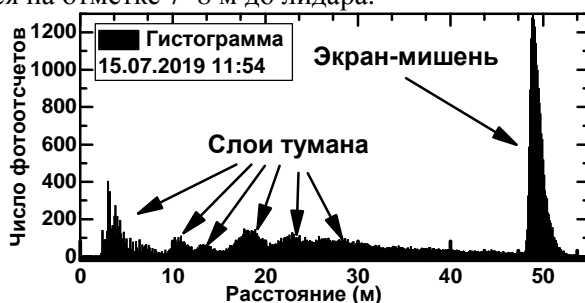


Рис. 2 Гистограмма сигнала обратного рассеяния при образовании многослойного (5–6 слоев) тумана в одном из сеансов измерений (15.07.2019, 11:24).

Впервые было продемонстрирована возможность различить 5–6 слоев тумана, что указывает на новые возможности и области применимости лидара — обнаружение таких аэрозольных структур,

измерение дистанции и скорости сближения с фронтом тумана-облака или вулканических шлейфов. Несомненно, что уникальный процесс генерации подобных динамических структур на большой длине в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории будет востребован для тестирования подобных лидаров для метеорологов и для обеспечения безопасности в портах, а также оснащения вертолётов и самолётов, как пилотируемых, так и беспилотных.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Першину С.М. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №19-19-00712) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации («Центр фотоники» № 075-15-2020-912).

1. Pershin S.M., Grishin M.Ya., Zavozin V.A., et al. *Laser Phys. Lett.* 2020, **17**, 026003.
2. Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др. *Квант. Электроника.* 2021, **51**, 423.
3. Першин С.М., Федоров А.Н., Тюрин А.В. и др. *Краткие Сообщения По Физике ФИАН.* 2019, **10**, 46.

## Генерация ультракоротких импульсов на основе нелинейного вращения плоскости поляризации в гантелевидном эрбиевом волоконном лазере

**Зверев А.Д., Камынин В.А.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-13-15

Ультракороткие импульсы (УКИ) лазерного излучения применяются в различных областях науки и техники [1]. Их используют в когерентной томографии [2], оптической связи [3], спектроскопии высокого разрешения [4], атомных часах [5]. Для микро-обработки материалов зачастую необходимы пакетные режимы генерации УКИ [6]. Одним из способов получения УКИ в волоконных лазерах является реализация режима пассивной синхронизации мод за счёт эффекта *нелинейного вращения плоскости поляризации* (НВПП).

В данной работе исследовались различные режимы генерации УКИ в гантелевидном эрбиевом волоконном лазере, работающем в режиме пассивной синхронизации мод за счёт эффекта НВПП. Схема лазера изображена на рис. 1.

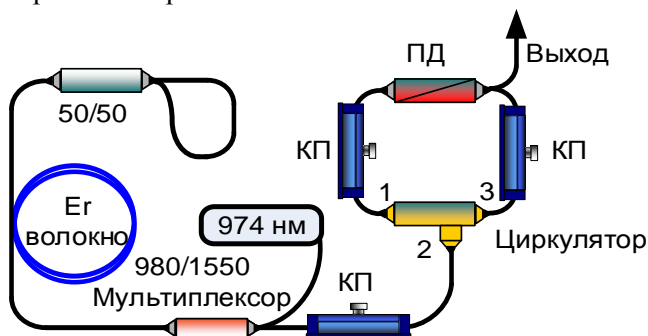


Рис. 1. Схема волоконного эрбиевого лазера.

ПД – поляризационный делитель; КП – контроллеры поляризации.

Циркулятор с соединёнными через поляризационный делитель первым и третьим каналами (излучение в циркуляторе распространяется из первого канала во второй и из второго в третий) является частично прозрачным зеркалом. Излучение из резонатора выводится через поляризационный делитель, следовательно, коэффициент отражения этого зеркала зависит от поляризации света в нём. Для возможности её изменения в схеме присутствуют три *контроллера поляризации* (КП). Роль второго, сильно отражающего зеркала играет оптический разветвитель (каплер) 50/50, замкнутый с одной из сторон. Из-за различных соотношений добротности резонатора (коэффициента отражения первого зеркала) и поляризации излучения, необходимой для пассивной синхронизации мод, возможно получение различных режимов генерации УКИ. Накачка трёх метров эрбиевого волокна осуществляется лазерным диодом на длине волны 974 нм. Наличие линейной части резонатора позволяет использовать уменьшенную длину волокна, легированного ионами эрбия, по сравнению с обычной кольцевой схемой [1], так как во время одного прохода резонатора импульсы дважды проходят активную часть.

Было зафиксировано несколько стабильных режимов генерации. При мощности накачки 48 мВт был получен режим одноимпульсной синхронизации мод (в резонаторе распространяется один импульс). Мощность излучения в данном случае была равна 5 мВт. Временные характеристики и спектр излучения изображены на рис. 2 (а) и (б) соответственно. Изменив положение контроллера поляризации, и уменьшив мощность накачки до 27 мВт, был получен режим генерации троек импульсов (рис. 2 (в)), с эквидистантным по времени расстоянием между импульсами равным 20 нс. Средняя мощность выходного излучения в данном случае была равна 2.3 мВт. Спектральные характеристики излучения иллюстрирует рис. 2 (г). Дополнительно изменяя положения контроллеров поляризации при мощности накачки равной 190 мВт, был получен режим генерации пакетов УКИ (средняя мощность 12 мВт). Внутри пакета период следования импульсов не превышал 2 нс, временное расстояние между пакетами было равно 20 нс (рис. 2 (д)). Спектр излучения представлен на рис. 2 (е).

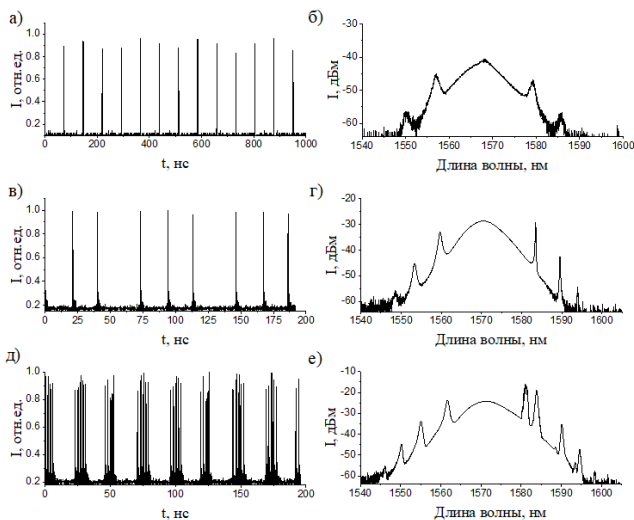


Рис. 2. Временные и спектральные характеристики излучения в различных режимах генерации.

(а), (б) — одноимпульсная генерация;  
(в), (г) — генерация троек импульсов; (д), (е) — пакетная генерация.

Таким образом в нашей работе были исследованы одноимпульсный, трёхимпульсный и пакетный режимы генерации УКИ в эрбиевом волоконном лазере с гантелевидным резонатором. Средние мощности выходного излучения были равны 5, 2.3 и 12 мВт соответственно для первого (рис. 2а, б), второго (рис. 2в, г) и третьего режимов (рис. 2д, е).

1. Kobtsev S., Smirnov S., Kukarin S., et al. *Opt. Fiber Technol.* 2014, **20**(6), 615–620.
2. Nishizawa N., Chen Y., Hsiung P., et al. *Opt. Lett.* 2004, **29**(24), 2846–2848.
3. Sardesai H.P., Chang C.C., and Weiner A.M. *J. Light. Technol.* 1998, **16**(11), 1953.
4. Potma E., Jones D.J., Cheng J.-X., et al. *Opt. Lett.* 2002, **27**(13), 1168–1170.
5. Udem T., Holzwarth R., & Hänsch T., *Nat.* 2002, **416**(6877), 233–237.
6. Obata K., Caballero-Lucas F., & Sugioka K. *J. Laser Micro Nanoeng.* 2021, **16**(1), 19–23.



## Прямая лазерная печать графена с ростовой подложки

**Курочицкий Н.Д., Комленок М.С.,  
Дежкина М.А., Рыбин М.Г.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-16-18

Технологический процесс перехода от синтеза графена к его применению в микроэлектронике часто является многоступенчатым и связан с серьёзным риском повреждения изначально синтезированного графена [1, 2]. Сейчас развиваются альтернативные методы, связанные с лазерной печатью [3, 4]. Такие методы должны значительно увеличить скорость процесса переноса и снизить экономические затраты, сохраняя изначальные характеристики материала. Применительно к графену, различные вариации лазерно-индуцированного переноса недавно стали вызывать особый интерес в научной среде [5–7]. В данной работе впервые предлагается использование блистерного лазерно-индуцированного прямого переноса для прямой печати графена с ростовой подложки, чтобы снизить количество избыточных манипуляций с графеном. Во время этого процесса лазерный импульс нагревает поглощающий слой, покрывающий прозрачную донорную подложку. Локальный нагрев вызывает частичное испарение поглощающей прослойки и возрастание давления, что приводит к выбросу материала с донорной подложки на акцептор. Чтобы успешно применить на практике предложенный метод, необходимо решить ещё одну задачу: разработать метод синтеза графена на тонких плёнках. Стандартной технологией синтеза графена является метод химического осаждения из газовой фазы на медную фольгу при высокой температуре из смеси аргона, водорода и метана при низком давлении. Эта технология уже показала свою высокую эффективность в синтезе высококачественного графена, о чём свидетельствует большое количество научных работ. Чтобы снизить количество манипуляций с графеном, мы улучшили технологию химического осаждения из газовой фазы для синтеза графена на

медной плёнке, которая будет в дальнейшем использоваться в качестве поглощающего слоя. Синтез графена на тонких медных плёнках — слабо изученный вопрос, о котором написано крайне мало работ [8–10]. Медная плёнка, синтезированная на сапфировой подложке, лучше подойдёт для синтеза графена, чем медная фольга, так как кристаллическая структура такой плёнки будет повторять структуру поверхности сапфира оптического качества. На рисунке 1 представлено изображение синтезированного графена, полученное с помощью *сканирующего электронного микроскопа (СЭМ)*, и результаты спектроскопии *комбинационного рассеяния (КР)* данного образца.

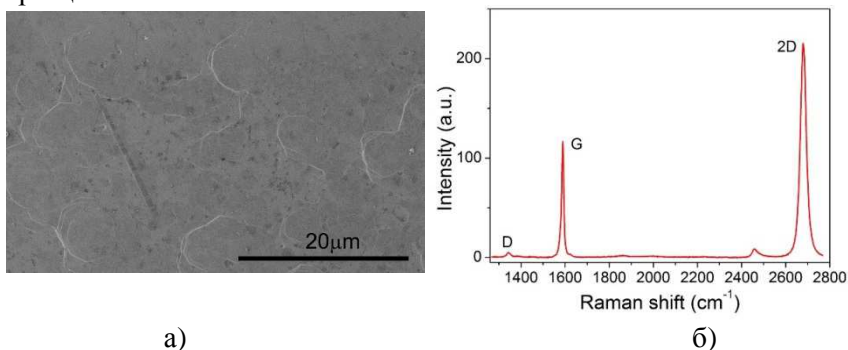


Рис. 1. СЭМ-изображение синтезированного на медной плёнке образца графена (а) и спектр КР этого образца (б).

Размеры графеновых элементов, которые требуются в современной микроэлектронике, имеют порядок в десятки микрон. Это накладывает соответствующее требование на размеры кристаллитов меди, на которой мы синтезируем графен. Для увеличения размеров кристаллитов меди был использован обжиг при высоких температурах для рекристаллизации металла. Тщательно подбирая параметры синтеза и переноса, удалось добиться переноса сплошных фрагментов графена с размерами до  $50 \times 50 \mu\text{m}$ . На рисунке 2 приведено изображение перенесённого фрагмента графена, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, и результаты КР спектроскопии данного фрагмента.

Исследование поддержано Российским научным фондом, грант № 18-72-10158.

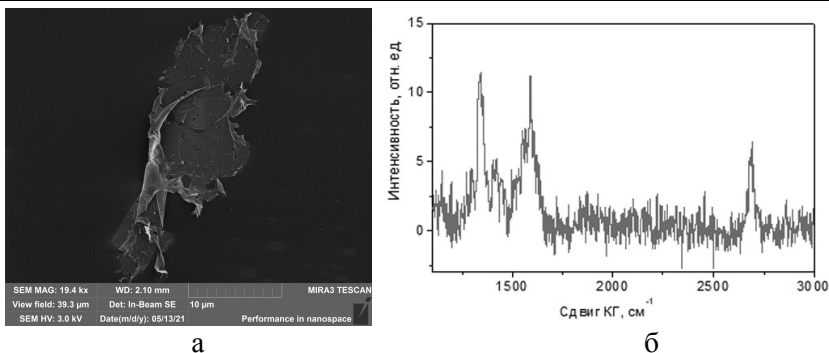


Рис. 2. Изображение СЭМ перенесённого графена (а)  
и спектр КР перенесённого участка плёнки (б)  
при  $E=3.2$  Дж/см<sup>2</sup> на контактной площадке

Авторы выражают благодарность Пивоварову П.А., Савину С.С., Поповичу А.Ф., Образцовой Е.Д. и Конову В.И. за постановку задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. M. Chen, R.C. Haddon, R. Yan, et al. *Materials Horizons*. 2017, **4**, 1054–1063.
2. B. Prevel, J.-M. Benoit, L. Bardotti, et al. *Appl. Phys. Lett.* 2011, **99**, 083116–3.
3. S. Papazoglou, Y.S. Raptis, S. Chatzandroulis, et al. *Appl Phys A*. 2014, **117**, 301–306.
4. N. Arutyunyan, M. Komlenok, T. Kononenko, et al. *Laser Physics*. 2019, **29**(2), 026001.
5. E.C.P. Smits, A. Walter, D.M.d. Leeuw, et al. *Appl Phys Lett*. 2017, **111**, 173101.
6. M. Komlenok, P. Pivovarov, M. Dezhkina, *Nanomaterials*. 2020, **10**(6), 1103.
7. Praeger M., Papazoglou S., Pesquera A., et al. *Applied Surface Science*. 2020, **533**, 147488.
8. K.M. Reddy, A.D. Gledhill, C.-H. Chen, et al. *Appl Phys Lett*. 2011, **98**, 113117.
9. P. Pavel, M. Jindřich, B. Dominik, et al. *Nanotechnology*. 2014, **25**, 185601.
10. T. Ma, H. Ariga, S. Takakusagi, et al. *Thin Solid Films*. 2018, **646**, 12–16.

## Создание спиральных волноводов в кварцевом стекле методом прямой фемтосекундной лазерной записи

**Лихов В.В.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-19-21

Оптические вихри, или пучки с *орбитальным угловым моментом* (ОУМ) интересны для обнаружения новых эффектов взаимодействия света с материей. ОУМ-пучки перспективны в сфере передачи и обработки информации [1]. Кроме того, ОУМ-пучки уже используются в микроскопии [2] и многих других областях оптики [3].

На практике ОУМ-пучки, как правило, получают с помощью специальных голограмм или *пространственных модуляторов света* (Spatial Light Modulator, SLM) [3]. Недавно было экспериментально продемонстрировано получение ОУМ-пучков с помощью записанной методом прямой фемтосекундной лазерной записи трёхмерной спирали [4]. В этой работе спираль образовывала волновод с оболочкой пониженного показателя преломления в кристалле Nd:YAG, а ОУМ-пучки генерировались в режиме брэгговского резонансного отражения. Недостатком исследованной конструкции является близкое расположение длин волн резонансов, что приводит к невысокой чистоте ОУМ-пучка. В волноводе, образованном спиралью с увеличенным показателем преломления, константы распространения ОУМ-мод будут сильнее разнесены по спектру, что позволит увеличить чистоту ОУМ-мод. Для достижения этой цели необходимо использовать материал, в котором изменение показателя преломления в модифицированной лазером области положительно. Таким свойством обладает, например, кварцевое стекло.

Для определения необходимых параметров записи в образце кварцевого стекла были записаны треки, т.е. прямые дорожки модифицированного лазером материала, с разными скоростями и энергиями импульсов. Использовался лазер Pharos SP (Light Conversion, Литва) с частотой следования импульсов 5 кГц и длиной волны 1030 нм. Кроме того, для получения чечевицеобразной формы

перетяжки пучок проходил через спектроскопическую щель с просветом 1 мм [4].

Каждой паре энергия-скорость соответствовали четыре трека, отличающиеся направлением записи и поляризацией (параллельно или перпендикулярно треку).

Методом *количественной фазовой микроскопии* (Quantitative Phase microscopy, QPm) было измерено изменение показателя преломления в каждом треке. На Рис. 1 приведены результаты для поляризации, перпендикулярной сканированию, усреднённые по двум направлениям движения. Установлено, что направление сканирования не оказывает значимого влияния на изменение показателя преломления.

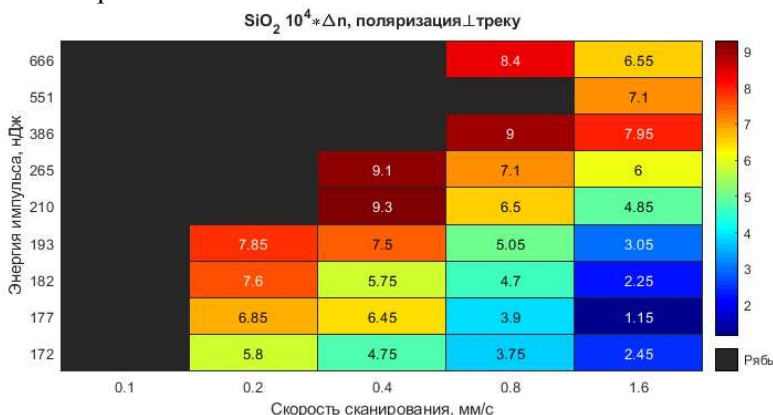


Рис. 1. Зависимость изменения показателя преломления ( $\Delta n$ ) в кварцевом стекле от скорости сканирования и энергии импульса.

Было обнаружено, что при высоких энергиях и низких скоростях режим записи резко изменяется, и треки становятся «рябыми». Определение изменения показателя преломления в таких треках затруднительно. Вероятно, смена режима модификации связана с образованием в кварцевом стекле нанорешёток. Наличие двулучепреломления в «рябых» треках подтверждает эту гипотезу.

После определения оптимальных параметров записи в образце кварцевого стекла марки КВ был записан спиральный волновод с шагом витков 1.6 мкм, что соответствует третьему брэгговскому порядку в области 1.55 мкм. Тангенциальная скорость движения пучка составляла 0.4 мм/с, энергия импульса — 265 нДж, поляризация перпендикулярна направлению движения перетяжки.

Микрофотография торца спирали представлена на Рис. 2.

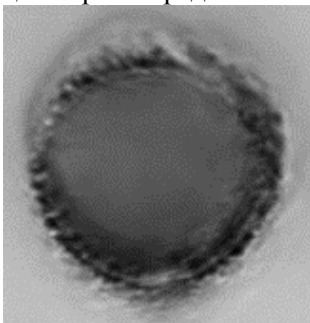


Рис. 2. Микрофотография торца спирали диаметром 25 мкм, записанной в кварцевом стекле.

Режим светлого поля с подсветкой сзади.

В докладе будут представлены результаты по характеристике спирального волновода и генерации ОУМ-пучка.

Автор выражает благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Охримчуку А.Г. за помощь в выборе направления исследований и плодотворные консультации.

1. Willner A.E. et al. *Advances in optics and photonics*. 2015, **7**(1), 66–106.
2. Ritsch-Marte M. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2017, **375**, 2087, 20150437
3. Shen Y. et al. *Light: Science & Applications*. 2019, **8**(1), 1–29.
4. Okhrimchuk A. et al. *CLEO/EUROPE-EQEC 2021*, 2021.

## Эволюция распределения наночастиц золота по размерам под действием лазерного излучения

**Симакин А.В., Смирнова В.В., Гудков С.В.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-22-24

Наиболее часто используемыми техниками синтеза наночастиц золота являются методы химического восстановления и лазерной абляции в жидкости. Применительно к областям биомедицины и биофизики, преимущество отдается методу лазерной абляции ввиду химически чистого способа получения наночастиц, а также функциональным особенностям синтеза наночастиц методом лазерной абляции, при котором можно получать наночастицы нужных размеров, варьируя параметры лазерного излучения.

Целью представленной работы является исследование динамики распределения наночастиц золота при лазерной фрагментации водных растворов наночастиц золота, определение минимальных размеров фрагментированных наночастиц и определение предельных значений концентраций при которых наступает процесс агломерации.

Наночастицы золота были получены при помощи техники лазерной абляции в воде. Для генерации наночастиц использовался Nd:YAG лазер со следующими характеристиками:  $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 10$  нс,  $\nu = 10$  кГц,  $\epsilon = 2$  мДж. В качестве рабочей жидкости для абляции использовалась деионизованная вода (20 мл). Толщина слоя жидкости между металлической мишенью и поверхностью воды составляла 2–3 мм. Длительность абляции составляла 30 минут. Полученные при помощи техники лазерной абляции коллоидные растворы наночастиц затем анализировались в дисковой центрифуге DC24000 (CPS Instruments).

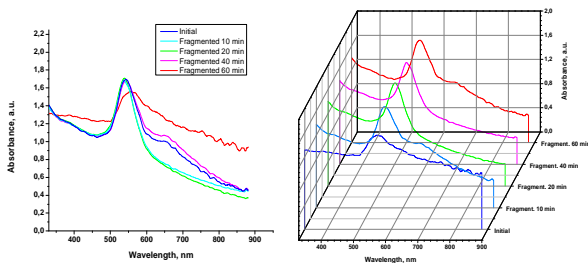


Рис. 1. Эволюция спектров поглощения коллоидных растворов наночастиц золота при различных временах фрагментации.

При облучении коллоидного раствора наночастиц золота были получены спектры поглощения коллоидного раствора при различном времени облучения (0, 10, 20, 40 и 60 мин.) (рис. 1). Как следует из рис. 1, спектр поглощения коллоидного раствора наночастиц золота при облучении лазерным излучением меняет форму, главным образом, в красной области (650–850 нм). Из полученных результатов следует, что процесс фрагментации наночастиц в течение первых 10 и 20 минут облучения приводит к исчезновению «плеча» в красной области на спектре поглощения, а значит, кроме изменения в концентрации наночастиц при фрагментации происходит образование наночастиц золота меньших размеров. Напротив, при дальнейшем облучении коллоидного раствора в течение 40 и 60 мин на спектре поглощения коллоидного раствора в красной области образуется «плечо», что говорит о появлении в коллоиде агломератов наночастиц золота более крупных размеров.

На рис. 2 представлено как изначальное распределение наночастиц золота по весу в зависимости от размера, так и динамика распределения при воздействии на коллоидный раствор лазерного излучения. Концентрация наночастиц золота в изначальном коллоиде составляла  $10^{10}$  шт./мл. Из рисунка следует, что в течение первых 10 минут облучения коллоидного раствора происходит интенсивная фрагментация наночастиц золота, о чем говорит уменьшение максимумов распределения на 20 и 48 нм и появление пика на 6–7 нм. При последующем облучении длительностью в 20 мин, процесс фрагментации наночастиц золота продолжается и концентрация наночастиц достигает максимума в  $2 \times 10^{11}$  шт./мл. При дальнейшем облучении размер агломератов увеличивается и достигает 19 нм. Концентрация наночастиц при этом уменьшается и



достигает значения приблизительно  $1 \times 10^{10}$  шт/мл.

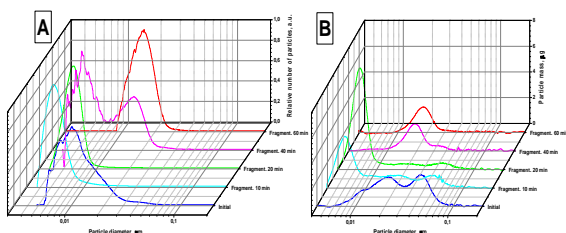


Рис. 2. Эволюция распределения наночастиц золота по числу частиц (А) и по весу (В) в зависимости от размера наночастиц при воздействии на коллоидный раствор лазерного излучения Nd:YAG лазера.

Из полученных экспериментальных результатов следует, что при облучении коллоидных растворов наночастиц золота в чистой воде в первое время происходит интенсивная фрагментация наночастиц золота и резкое увеличение концентрации наночастиц. Затем, при достижении пороговой концентрации, наблюдается уменьшение числа мелких частиц в коллоиде и образование агломератов. Наблюдаемый в эксперименте процесс образования агломератов может быть объяснен увеличением вероятности контактированием мелких наночастиц друг с другом. Скорость этого процесса напрямую связана с величиной концентрации — чем больше концентрация наночастиц, тем число контактов наночастиц будет больше и, как результат, скорость образования агломератов наночастиц должна быть выше [1].

1. Simakin A.V., Baimler I.V., Smirnova V.V. et al. Physics of Wave Phenomena, 2021, **29**(2), 102–107.

**Исследование динамики генерации  
ВКР-лазера на кристалле  $\text{BaWO}_4$   
с комбинированным сдвигом частоты ( $925+332 \text{ см}^{-1}$ )  
при синхронной пикосекундной накачке**

**Терещенко Д.П.<sup>1</sup>, Пеганов Е.А.<sup>2</sup>**

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

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-25-27

В настоящее время представляет интерес создание рамановских лазеров сверхкоротких импульсов излучения. При нестационарном *вынужденном комбинационном рассеянии* (ВКР) имеется возможность многократного сокращения длительности ВКР импульсов по сравнению с импульсами накачки. Реализация внутрирезонаторного каскадного ВКР при синхронной накачке позволяет сократить длительность импульсов ВКР до обратной ширины линии спектра *спонтанного комбинационного рассеяния* (СКР) [1]. В данной работе исследовалась динамика генерации компонент ВКР в вольфрамате бария при синхронной накачке. Кристаллы  $\text{BaWO}_4$  уже широко использовались в большом количестве рамановских лазеров. Наряду с другими кристаллами со структурой шеелита, интересной для нестационарного ВКР особенностью является наличие в спектре СКР двух интенсивных линий: интенсивной высокочастотной ( $\nu_1 = 925 \text{ см}^{-1}$ ), соответствующей моде полносимметричных внутренних колебаний анионных комплексов, и низкочастотной ( $\nu_2 = 332 \text{ см}^{-1}$ ), которая является самой широкой из-за перекрытия двух мод деформационных внутренних колебаний анионных комплексов [2].

Для изучения динамики генерации был построен ВКР-лазер с синхронной накачкой. В качестве источника возбуждения использовался  $\text{YAlO}_3:\text{Nd}^{3+}$ -лазер (длина волны 1079 нм, длительность импульса  $\tau = 80 \text{ пс}$ ) с регулируемым числом импульсов в цуге. В представленном эксперименте число импульсов в цуге

устанавливалось равным 56. Излучение накачки фокусировалось в пятно радиусом 300 мкм в ВКР-кристалл  $BaWO_4$  длиной 43 мм, помещенный в линейный резонатор (рис. 1) со временем обхода, синхронизированным с периодом следования импульсов накачки. Для регистрации спектра ВКР-излучения спектрометром OceanOptics USB2000, работающим в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм, частота выходного излучения удваивалась в кристалле  $LiIO_3$ , обладающем спектрально некритичным синхронизмом. Регистрация цугов выходного излучения и накачки производилась с помощью лавинных фотодиодов ЛФД-2А и осциллографа Tektronix TDS200.

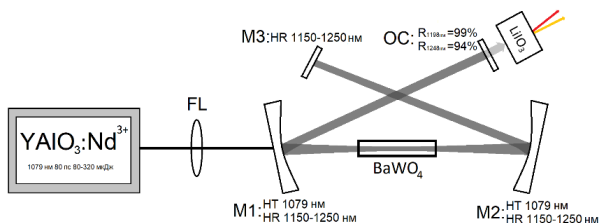


Рис. 1. Схема ВКР-лазера.

В ходе эксперимента была получена не только генерация первой стоксовой компоненты ВКР-излучения с высокочастотным сдвигом ( $\nu_1$ ) на длине волны 1198 нм, но также генерация второй стоксовой компоненты ВКР-излучения с комбинированным сдвигом частоты ( $\nu_1 + \nu_2$ ) на длине волны 1248 нм (рис. 2).

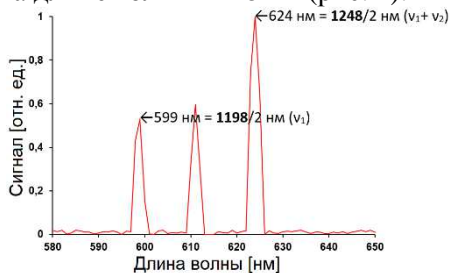


Рис. 2. Спектрограмма второй гармоники выходного излучения.

На рис. 3 представлен пример осциллограмм цугов импульсов излучения накачки и ВКР-излучения при различных значениях энергии цуга импульсов излучения накачки  $W_{\text{pump}}$ . Обнаружено, что при повышении уровня накачки отставание начала генерации первой стоксовой компоненты относительно накачки ожидаемо уменьшается

со 120 нс (15 импульсов) при  $W_{\text{pump}} = 80$  мкДж до 32 нс (4 импульса) при  $W_{\text{pump}} = 320$  мкДж, но задержка генерации каскадной ( $\nu_1 + \nu_2$ ) ВКР-компоненты относительно начала генерации первой ( $\nu_1$ ) стоксовой ВКР-компоненты практически не изменяется и составляет 32 нс (4 импульса).

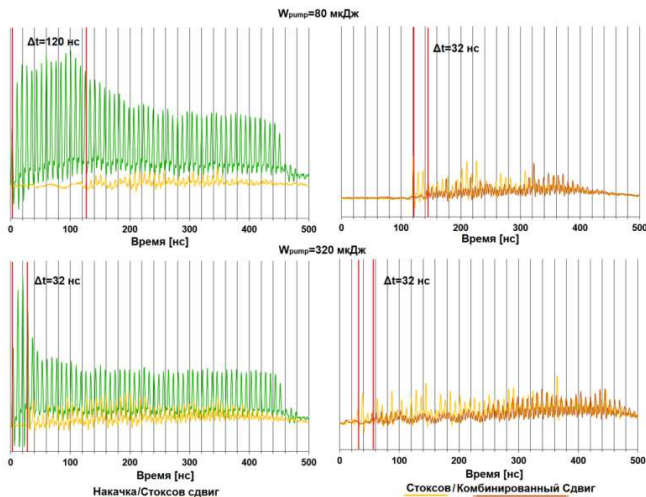


Рис. 3. Осциллограммы цугов импульсов накачки и ВКР.

Полученные результаты объясняются тем, что для каскадной компоненты ВКР с комбинированным сдвигом частоты из-за разрыва комбинационно-параметрической связи с излучением накачки преобразование частоты происходит исключительно путем ВКР из первой стоксовой компоненты, обладающей высокой интенсивностью внутри добротного резонатора. Данный результат имеет научную значимость для дальнейших работ по осуществлению максимального сжатия импульсов ВКР-излучения с комбинированным сдвигом частоты под действием внутрирезонаторной накачки первой стоксовой компонентой ВКР.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. С.Н. Сметанину, и А.Г. Папашвили за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Frank M., Smetanin S.N. Jelinek M. et al. Crystals. 2019, **9**, 167.
2. Frank M., Smetanin S.N. Jelinek M. et al. Laser Phys. 2018, **28**, 25403.

# Исследование гомологического ряда нормальных спиртов методами спектроскопии комбинационного рассеяния света

**Яблочникова М.С.**

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

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

DOI:10.24412/c1-35673-2021-1-28-30

Спектроскопия *комбинационного рассеяния* (КР) света является хорошо известным неразрушающим методом исследования органических молекул, позволяющим проводить анализ веществ в любом агрегатном состоянии. Однако закономерности в спектрах КР гомологических рядов органических молекул, позволяющие связать спектральные характеристики линий КР и структурные характеристики вещества, до сих пор мало изучены.

В настоящей работе мы представляем изучение методом спектроскопии КР гомологического ряда нормальных спиртов ( $C_{2n}H_{2n+1}OH$ ), а также изомеров бутанола ( $C_4H_9OH$ ). Наша цель — связать спектральные характеристики линий КР с длиной, конформационным и изомерным составом молекул спиртов. Такое исследование представляет интерес для фармацевтики, косметологии, топливной и пищевой промышленности.

Спектры КР нормальных спиртов с  $n = 2-16$ , изобутанола и бутанола-2 были зарегистрированы со спектральным разрешением  $5 \text{ см}^{-1}$  при длине волны возбуждения 532 нм. В дополнение, на основе теории функционала плотности были рассчитаны структуры и спектры КР молекул этих соединений в различных конформациях. Расчёты проводились в некоммерческой программе «Природа». В качестве функционала и базиса были выбраны функционал OLYP и расширенный базис гауссова типа 4z.bas. Отметим, что при нормальных условиях спирты с  $n \leq 10$  являются жидкостями, начиная с  $n = 11$  — твердыми веществами.

Было обнаружено, что, по крайней мере, частоты двух линий КР в спектрах нормальных спиртов зависят от длины молекулы. Первая линия локализована в области  $1090-1150 \text{ см}^{-1}$  и соответствует симметричному валентному колебанию C–C связей в молекулах, в которых все атомы углерода вместе с атомом кислорода образуют

плоский зигзаг ( $C_n$ -O *транс*-последовательности). Частота ( $\nu_s(C-C)$ ) этого колебания не зависит от состояния вещества и связана с длиной молекулы нормального спирта как:

$$\nu_s(C-C) = 1132.52 - 73.33/n \text{ [см}^{-1}\text{]}, \quad (1)$$

где  $n$  — количество атомов углерода в молекуле нормального спирта. Зависимость частоты симметричного валентного колебания C–C связей от количества атомов углерода в молекуле нормального спирта показана на рис. 1.

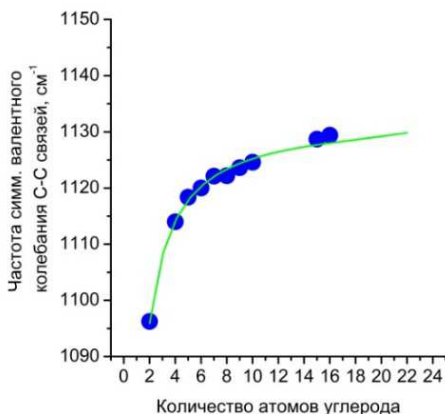


Рис. 1. Зависимость частоты симметричного валентного колебания C–C от количества атомов углерода в молекуле нормального спирта.

● — данные эксперимента, — регрессионная зависимость (1).

Вторая линия, зависящая от длины молекулы, является самой интенсивной в диапазоне  $0-600 \text{ см}^{-1}$  и отвечает деформационным колебаниям C–C- и C–O-групп. Однако эта линия в твёрдых спиртах и жидких спиртах с  $n \leq 6$  соответствует колебаниям в  $C_n$ -O *транс*-последовательностях, в спиртах с  $n = 7-10$  — колебаниям в неплоских молекулах. Ввиду этого, для всего гомологического ряда нормальных спиртов невозможно найти простую зависимость, связывающую длину молекулы и частоту ( $\nu_d$ ) деформационных колебаний C–C и C–O. Однако мы обнаружили, что для спиртов с  $n = 5-10$  связь частоты этого колебания и длины молекулы хорошо описывается соотношением:

$$\nu_d = 5590 \times (n+1)^{-2} + 198 \text{ [см}^{-1}\text{]}. \quad (2)$$

Квантово-химические расчеты, сделанные для молекулы изобутанола, показывают, что анализ линий КР около  $800 \text{ см}^{-1}$

позволяет характеризовать молекулы спиртов с точки зрения их конформационного состава. Один из результатов такого исследования показан на рис. 2. Как видно из рис. 2, в экспериментальном спектре КР изобутанола частоты 820 и 785  $\text{см}^{-1}$  соответствуют колебаниям молекул в разных конформациях, условно обозначенных 1 и 2. Конформация 1 объединяет такие, в которых атом кислорода образует плоский зигзаг с тремя атомами углерода, конформация 2 — в которых атом кислорода образует неплоский зигзаг с любыми тремя атомами углерода (Рис. 2). Отметим, что обе частоты относятся к «дышащему» колебанию в химической группе  $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ .

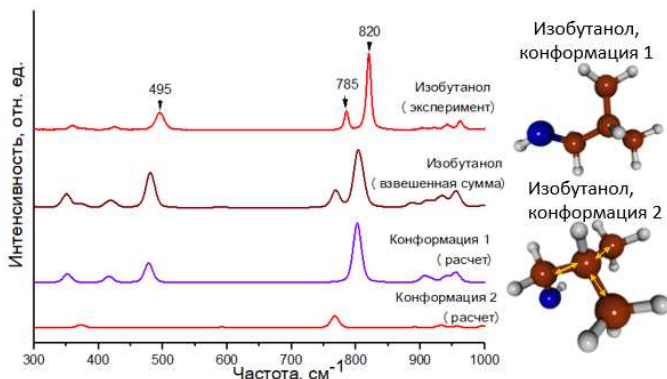


Рис. 2. Экспериментальные и рассчитанные спектры КР изобутанола ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ), а также структура его молекул в двух конформациях.

Красные, синие и серые сферы обозначают соответственно атомы углерода, кислорода и водорода, желтыми стрелками показаны направления движения атомов углерода при «дышащем» колебании.

Весовые коэффициенты пропорциональны содержанию молекул в каждой конформации, которое оценивалось при помощи распределения Больцмана.

Таким образом, по результатам нашего исследования был сделан вывод, что спектроскопия КР является перспективным методом с точки зрения количественного анализа спиртов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-02-00931-а. Авторы выражают благодарность Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН за предоставленные вычислительные ресурсы.

# КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

## Деформационные расщепления в SiV-центрах окраски алмаза: влияние отжига на динамику

**Болдырев К.Н.<sup>1</sup>, Хомич А.А.<sup>2</sup>, Седов В.С.<sup>3</sup>**

*1- Институт спектроскопии*

*Российской академии наук, Троицк, Москва*

*2- Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова*

*Российской академии наук, Фрязино*

*3- Институт общей физики им. А.М. Прохорова*

*Российской академии наук, Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-31-33

Благодаря своим уникальным свойствам алмаз является чрезвычайно перспективным материалом для различных применений, от силовой электроники и квантовой криптографии до медико-биологических применений. Он имеет хорошие полупроводниковые свойства, обладает высочайшей твердостью и теплопроводностью, прозрачен от радиочастотного до глубокого ультрафиолетового диапазона. Благодаря совершенной кристаллической структуре, оптически активные дефекты в алмазе характеризуются узкими линиями с ярко выраженной тонкой структурой в спектрах поглощения и люминесценции. Такие дефекты традиционно называют *центрами окраски* (ЦО), которых в настоящий момент для алмаза уже известно более сотни [1], и это число постоянно растет. Такие центры могут обладать различным зарядовым состоянием и структурой, что приводит к широким вариациям в оптических, электронных и спиновых свойствах. В связи со слабым электрон-фононным взаимодействием, многие центры окраски имеют узкие линии даже при комнатной температуре, что находит применение в источниках одиночных фотонов, в тераностике, наноскопии, квантовой сенсорике [2]. Наиболее изученными ЦО являются азот-вакансионные дефекты с различным зарядовым состоянием ( $NV^0$ ,  $NV^-$ ) [1, 3], кремний-вакансионные центры ( $SiV^0$ ,  $SiV^-$ ) [1, 2, 4], и относительно новые,



связанные с германием, оловом, свинцом (GeV [5–7], SnV [2], PbV [2]).

В настоящей работе исследуются образцы монокристаллического алмаза с кремний-вакансионными ЦО, выращенные методом химического осаждения из газовой фазы (*Chemical Vapor Deposition, CVD*). Для уменьшения влияния изотопического состава на ширину линий в спектре использовался моноизотопный кремний  $^{28}\text{Si}$ . Затем, полученная монокристаллическая пленка с центрами окраски  $^{28}\text{SiV}$  толщиной 30 мкм подверглась облучению электронами с энергией 2 МэВ для создания дефектной структуры. В результате, в кристалле образуется большое количество радиационно-наведенных дефектов, которые, находясь рядом с ЦО, влияют на окружающее их кристаллическое поле, приводя к искажениям в тонкой структуре спектра. В данном случае мы наблюдали дополнительные расщепления в тонком спектре  $^{28}\text{SiV}^-$ , связанные с так называемым расщеплением от случайных деформаций [8–10]. Ранее подобные расщепления наблюдались для NV-центра [11].

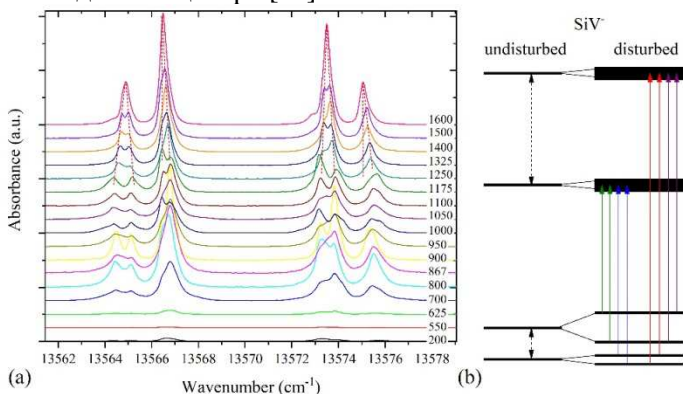


Рис. 1. Низкотемпературные ( $T = 5\text{ K}$ ) спектры поглощения центров  $^{28}\text{SiV}^-$  при различной температуре отжига (а) и схема энергетических уровней  $^{28}\text{SiV}^-$  при деформационном расщеплении (б).

Исследование деформационного расщепления позволяет оценить количество дефектов кристаллической решетки, а также вызванные ими величины деформаций. По деформационному расщеплению можно судить о качестве исследуемого образца, что чрезвычайно важно в случае квантовых применений центров окраски

в алмазе. Исследование же влияния температурного отжига на величину деформационного расщепления позволяет оценить температуру, при которой наступает восстановление кристаллической решетки. В нашем случае мы проводили постепенный отжиг в вакууме вплоть до температуры 1600 °С. Время отжига при каждой температуре составляло 2 часа. Мы наблюдали, что при 1600 °С деформационное расщепление практически исчезает (см. рис. 1а). Зависимость величины расщепления от температуры отжига показала, что происходит расщепление основного состояния  $\text{SiV}^-$ , в то время как возбужденные уровни практически не испытывают деформационного расщепления (см. рис. 1б). Таким образом, нижние уровни энергии кремний-вакансионного ЦО более чувствительны к случайным деформациям, что можно использовать для анализа качества исследуемых образцов.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Ральченко В.Г. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (синтез и обработка образцов — грант №21-72-10153, спектроскопические исследования — грант №19-72-10132).

1. Zaitsev A.M., Optical Properties of Diamond. A Data Handbook, Heidelberg: Springer-Verlag, Berlin, 2001.
2. Bradac C., Gao W., Forneris J., et al. Nat. Comm. 2019, **10**, 5625.
3. Trofimov S.D., Tarelkin S.A., Bolshedvorskii S.V., et al. Opt. Mat. Exp. 2020, **10**, 198–207.
4. Ralchenko V.G., Sedov V.S., Martyanov A.K., et al. ACS Photonics. 2019, **6**, 66–72.
5. Ekimov E.A., Lyapin S.G., Boldyrev K.N., et al. JETP Lett. 2015, **102**, 811.
6. Boldyrev K.N., Mavrin B.N., Sherin P.S., et al. J. Lumin. 2018, **193**, 119–124.
7. Eremchev I.Yu., Neliubov A.Yu., Boldyrev K.N., et al. J. Phys. Chem. C 2021, in press, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c02617>.
8. Malkin B.Z., Abishev N.M., Baibekov E.I., et al. Phys. Rev. B 2017, **96**, 014116.
9. Boldyrev K.N., Popova M.N., Malkin B.Z., et al. Phys. Rev. B Rap. Comm. 2019, **99**, 041105(R).
10. Boldyrev K.N., Abishev N.M., Mumdzi I.E., et al. Phys. Rev. B 2021, **103**, 054103.
11. Biktagirov T.B., Smirnov A.N., Davydov V.Yu., et al. Phys. Rev. B 2017, **96**, 075205.

## Анизотропия рассеяния носителей заряда в антиферромагнетиках $RB_{12}$ ( $R=Ho, Er, Tm$ )

**Красиков К.М., Азаревич А.Н.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-34-35

Магнетики с фрустрированным основным магнитным состоянием привлекают существенное внимание в силу набора аномальных свойств, потенциально применимых на практике. Среди них антиферромагнетики из семейства редкоземельных додекаборидов  $RB_{12}$  ( $R = Ho, Er, Tm$ ) представляют особый интерес, так как, обладая сравнительно простой ГЦК решеткой, демонстрируют сложную несоразмерную магнитную структуру с антиферромагнитным упорядочением при  $T < T_N$ . Недавно в немагнитном реперном соединении  $LuB_{12}$  [1] было обнаружено формирование вдоль направления  $[110]$  динамических зарядовых страйпов, возникающих в результате динамического кооперативного эффекта Яна-Теллера на кластерах  $B_{12}$ . Подобная электронная неустойчивость должна присутствовать в антиферромагнетиках  $HoB_{12}$ ,  $ErB_{12}$  и  $TmB_{12}$ , так как она присуща именно борной подрешетке. В связи с этим, отдельный интерес представляет изучение механизмов рассеяния носителей заряда в таких системах с одновременным наличием несоразмерной магнитной структуры и динамических зарядовых страйпов.

Ранее было показано [2], что в АФ-состоянии  $HoB_{12}$  зависимости *магнетосопротивления* (МС) от магнитного поля можно описать суммой линейного положительного и квадратичного отрицательного вкладов во внешнем магнитном поле. Коэффициенты А и В, которые определяют два различных механизма рассеяния носителей заряда на (i) волне спиновой плотности и (ii) локальных 4f-5d спиновых флуктуациях, были получены и детально проанализированы. В [3] было показано, что наличие в соединении ферромагнитной компоненты намагниченности может приводить к возникновению отрицательного линейного магнетосопротивления в

антиферромагнетиках и появлению аномалии в окрестности точки Кюри  $T_C$ . В настоящей работе приводится анализ с разделением вкладов для  $\text{HoV}_{12}$  и  $\text{ErV}_{12}$  и сравнение эволюции механизмов рассеяния при изменении температуры и магнитного поля для  $\text{HoV}_{12}$ ,  $\text{ErV}_{12}$  и  $\text{TmV}_{12}$ .

В работе представлены результаты измерения удельного сопротивления  $\text{HoV}_{12}$ ,  $\text{ErV}_{12}$  и  $\text{TmV}_{12}$  в диапазоне температур 1.7–10 К, в магнитном поле до 80 кЭ, направленном вдоль основных осей в ГЦК кристалле ( $\mathbf{H} \parallel [001]$ ,  $\mathbf{H} \parallel [110]$  и  $\mathbf{H} \parallel [111]$ ), а также угловых зависимостей магнетосопротивления. Измерение удельного сопротивления проводилось на автоматизированной оригинальной установке для гальваномагнитных исследований в ИОФ РАН. Использовался стандартный четырехконтактный метод измерения сопротивления на постоянном токе с коммутацией тока через образец.

Обнаруженная сильная угловая анизотропия МС и найденных коэффициентов  $A$  и  $B$  (линейный вклад переменного знака и квадратичный отрицательный вклады соответственно), крайне нетипичная для ГЦК кристалла, объясняется наличием в рассматриваемых кристаллах  $\text{RV}_{12}$  конкуренции между различными механизмами рассеяния: рассеяние (i) на ферромагнитных доменах наноразмера, (ii) на волне спиновой плотности и (iii) на локальных 4f-5d спиновых флуктуациях, а также следствием сильной перенормировки косвенного РККИ-обмена через электроны проводимости из-за перераспределения носителей заряда в квантовые колебания (динамические полосы заряда), направленные вдоль  $[110]$ .

Автор выражает благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Случанко Н.Е. за постановку научной задачи, Шицеваловой Н.Ю. и Филипову В.Б. за предоставление высококачественных монокристаллов додекаборидов для измерений, а также сотрудникам отдела низких температур и криогенной техники ИОФ РАН за помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. N.B. Bolotina et al., J. Phys. Condens. Matter. 2018, **30**(26), 265402.
2. K.M. Krasikov et al., Solid State Sci., 2020, **104**, 106253.
3. H. Yamada and S. Takada, Prog. of Theor. Phys. 1972, **48**, 6A.

## Эволюция спектров комбинационного рассеяния поливинилхлорида, подвергнутого фото- и термовоздействиям

**Кузнецов С.М.**

*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-35673-2021-1-36-38

Поливинилхлорид (ПВХ) востребован практически во всех областях человеческой деятельности (например, при изготовлении медицинских изделий, изоляционных кабелей, оптических сенсоров, бытовых товаров). При различных внешних воздействиях (УФ облучение, нагрев, химические воздействия и т.п.) от молекул ПВХ отделяются атомы H и Cl, что приводит к образованию в полимере полиенов, которые представляют собой углеводородные цепи различной длины, состоящие из чередующихся одинарных (C–C) и двойных (C=C) углеродных связей. Пример структуры молекулы деградированного ПВХ представлен на рисунке 1.

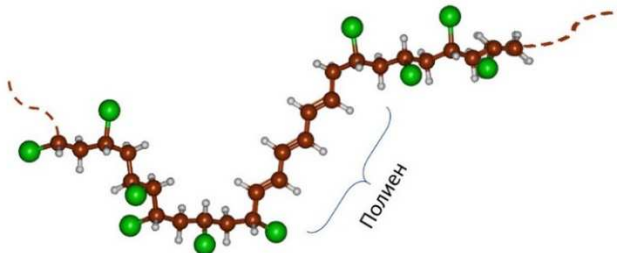


Рис. 1. Модельная структура макромолекулы ПВХ, содержащей полиен. Красные сферы – атомы углерода, серые – водорода, зелёные – хлора.

Присутствие полиенов сильно влияет на оптические, электрические и механические свойства ПВХ. Ввиду этого, исследование влияния внешних воздействий на структуру и свойства ПВХ является актуальной задачей. Также актуальной задачей является разработка методов диагностики, позволяющих определять содержание полиенов в ультрамалых количествах (при потерях HCl менее 0.1 %).

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) является

перспективным методом исследования структуры деградированного ПВХ, так как благодаря резонансному усилению линий КР, которое наблюдается при возбуждении спектров излучением с длиной волны в видимой области, возможно селективно детектировать полиены различной длины при потерях HCl от 0.0001 %.

Целью работы является изучение методом спектроскопии КР структурных изменений в ПВХ при фото- и термовоздействиях.

Были исследованы плёнки ПВХ, подвергнутые УФ облучению светом с длиной волны 365 нм и нагреву при температурах 65 и 110 °С. Спектры КР регистрировались в геометрии рассеяния на 90°, со спектральным разрешением 5 см<sup>-1</sup>, для возбуждения спектров использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 532 нм (Sapphire SF 532, Coherent Inc., США). При такой длине волны возбуждения наблюдается резонансное и пререзонансное усиление сигнала КР для полиенов, содержащих от 15 до 25 С=С связей [1].

На рисунке 2 представлены спектры КР плёнок ПВХ, зарегистрированные до и после деградации. Интенсивные линии с максимумами около 1120 и 1500 см<sup>-1</sup> относятся соответственно к валентным колебаниям С–С и С=С связей в полиенах. Стрелки показывают положения максимумов этих линий. Линия с максимумом около 1440 см<sup>-1</sup> отвечает деформационным колебаниям С–Н связей.

Из рисунка 2 видно, что в спектре недеградированного ПВХ отсутствуют линии с максимумами около 1120 и 1500 см<sup>-1</sup>, что говорит об отсутствии полиенов в этом образце. В случае деградированных образцов для линий колебаний С–С и С=С связей выявлены следующие закономерности.

Во-первых, при увеличении как температуры нагрева образцов, так и времени УФ облучения происходит увеличение интенсивности обеих линий. Так как их интенсивность пропорциональна количеству полиенов, можно сделать вывод, что при таком изменении условий деградации в образцах образуется всё больше полиеновых последовательностей, содержащих от 15 до 25 С=С связей.

Во-вторых, различные условия деградации отразились на форме линии, отвечающей валентным колебаниям С=С связей. На рисунке 2 видно, что и при увеличении времени УФ облучения, и при более сильном нагреве образцов увеличилась интенсивность низкочастотной компоненты этой спектральной линии, и её

максимум сдвинулся в сторону низких частот. Всё это говорит о том, что в образцах изменилось распределение полиенов по длинам: при более жёстком воздействии в плёнках увеличивается содержание более длинных полиенов.

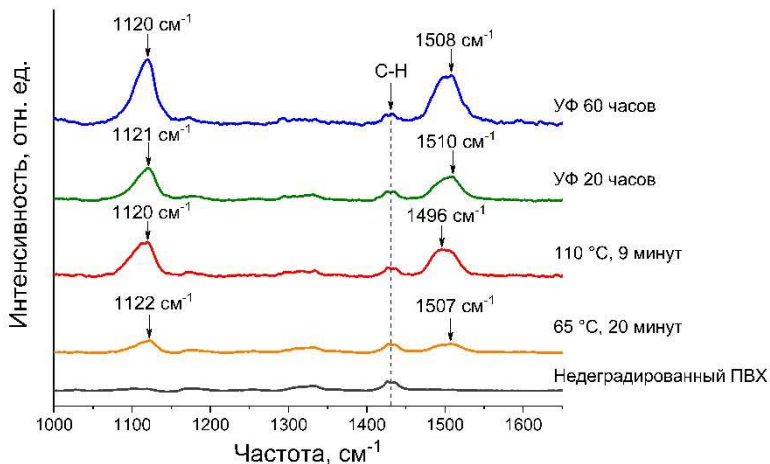


Рис. 2. Экспериментальные спектры КР плёнок ПВХ, зарегистрированные до и после фото- и термодegradации.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов спектроскопии КР для определения содержания и распределения по длинам полиенов в деградированном ПВХ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90209.

1. Kuznetsov S.M., Sagitova E.A., Prokhorov K.A. et al. Spectrochim. Acta - Part A. Mol. Biomol. Spectrosc. 2021, **252**, 119494.

## Исследование водных растворов гликолей методом спектроскопии комбинационного рассеяния

**Любимовский С.О., Новиков В.С.**

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

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

DOI:10.24412/c1-35673-2021-1-39-41

Благодаря низкой температуре замерзания водные растворы этиленгликоля (ЭГ,  $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ ) и 1,3-пропиленгликоля (1,3-ПГ,  $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ ) широко используются как компоненты антифризов. В зависимости от соотношения содержаний компонентов свойства раствора, такие как температура замерзания, теплопроводность и вязкость, изменяются в широких пределах. Анализ спектров комбинационного рассеяния (КР) позволяет определять химический и конформационный состав подобных растворов. Однако, до настоящего момента этот метод не применялся для систематических исследований структуры водных растворов ЭГ и 1,3-ПГ.

Целью работы был сравнительный анализ изменений в конформационном составе ЭГ и 1,3-ПГ в водных растворах при различных концентрациях, а также создание КР спектроскопического метода оценки содержаний компонентов таких растворов.

Рисунки 1 и 2 демонстрируют соответственно спектры КР водных растворов ЭГ и 1,3-ПГ в области  $2600-4000 \text{ см}^{-1}$  при различных мольных содержаниях гликоля. Полоса валентных колебаний ОН-групп наблюдается в диапазоне  $3000-3800 \text{ см}^{-1}$  как в спектре воды, так и в спектрах гликолей. Для определения содержаний компонентов растворов в данной работе предлагается использовать отношение интенсивности полосы валентных колебаний ОН-групп к интенсивности линии КР гликоля.

На рисунке 3 для наиболее интенсивных и хорошо разрешенных линий КР гликолей приведены зависимости отношений пиковых интенсивностей линий от отношения мольных содержаний компонентов раствора. Полученные зависимости являются



линейными, и, таким образом, по спектрам КР можно оценить содержание компонентов в водных растворах гликолей.

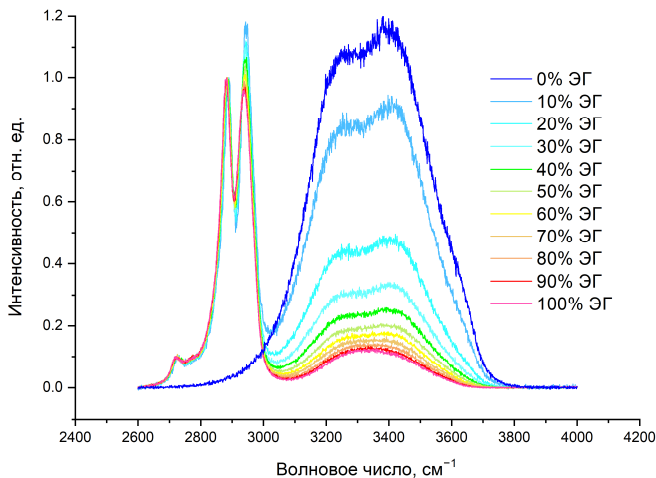


Рис. 1. Спектры КР водных растворов при различных мольных содержаниях ЭГ

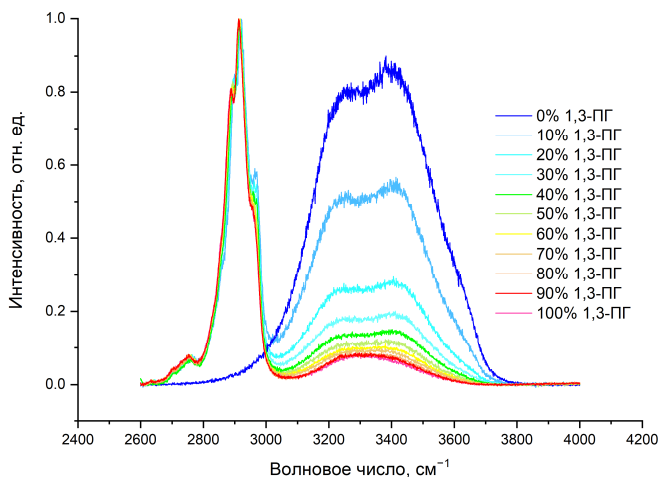


Рис. 2. Спектры КР водных растворов при различных мольных содержаниях 1,3-ПГ

Установлено, что спектры КР ЭГ и 1,3-ПГ в диапазоне  $300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$  практически не меняются при всех концентрациях ЭГ и

1,3-ПГ. В том числе, не меняются положения пиков и интенсивности полос около  $860\text{ см}^{-1}$  — маркеров *gou*-конформеров для торсионных углов O–C–C–O и O–C–C–C в молекулах ЭГ и 1,3-ПГ соответственно [1]. Это означает, что конформационный состав ЭГ и 1,3-ПГ при растворении в воде меняется незначительно. Этот же вывод подтверждает линейность зависимостей, приведенных на рисунке 3.

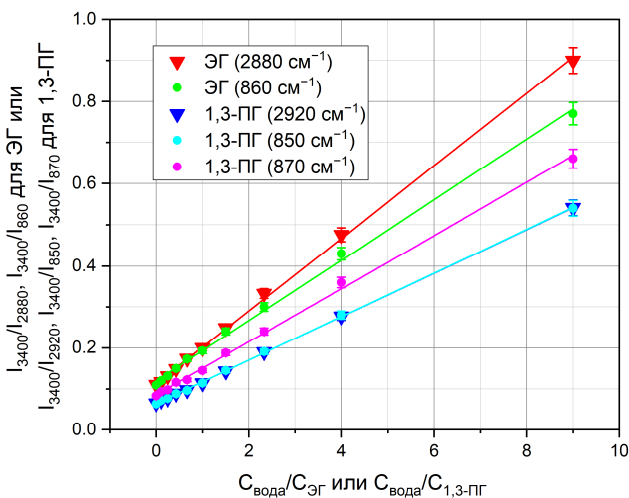


Рис. 3. Отношения интенсивности полосы валентных ОН-колебаний к интенсивности линий КР около  $2880$  и  $860\text{ см}^{-1}$  для ЭГ и к интенсивности линий КР около  $2920$ ,  $850$  и  $870\text{ см}^{-1}$  для 1,3-ПГ как функции отношения мольных содержаний компонентов раствора

Таким образом, в работе показано, что конформационный состав молекул ЭГ и 1,3-ПГ при растворении в воде меняется незначительно. Предложен КР спектроскопический метод оценки содержания компонентов водных растворов ЭГ и 1,3-ПГ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-02-00931.

1. Kuzmin V.V., Novikov V.S., Sagitova E.A., et al. J. Mol. Struct. 2021, **1243**, 130847.

## Управление зарядовым состоянием центров окраски в алмазах с помощью рентгеновского излучения

**Сектаров Э.С.<sup>1,2</sup>, Седов В.С.<sup>3</sup>, Болдырев К.Н.<sup>1</sup>**

*1- Институт спектроскопии*

*Российской академии наук, Троицк, Москва*

*2- Национальный исследовательский университет*

*«Высшая школа экономики», Москва*

*3- Институт общей физики им. А.М. Прохорова*

*Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [sektarov\\_es@mail.ru](mailto:sektarov_es@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-42-44

Кристаллы с центрами окраски обширно используются в различных областях промышленности и науки. Благодаря широкой вариации свойств таких объектов, их можно использовать для разработки разнообразных квантовых устройств, что вызывает интерес к исследованиям и поиску новых применений. Центры окраски представляют собой дефект кристаллической решетки, который поглощает и/или излучает в диапазоне длин волн вне области собственного поглощения кристалла. Их можно получить путем воздействия рентгеновским или  $\gamma$ -излучениями, бомбардировкой нейтронами, химическим осаждением из газовой фазы. Наиболее перспективными областями применения центров окраски в кристаллах являются оптическая квантовая память, квантовая сенсорика, наноскопия, квантовая криптография и др.

В настоящей работе были проведены эксперименты по управлению зарядовыми состояниями центров окраски в алмазе, а именно, азот-вакансионных (NV), кремний-вакансионных (SiV), германий-вакансионных (GeV) центров. Все исследуемые образцы были получены методом осаждения из газовой фазы (CVD) алмазных монокристаллических пленок на номинально беспримесные алмазные НРНТ-подложки. В процессе роста в газовую смесь вводился дополнительный газ: силан — для получения SiV, герман — для получения GeV, азот — для получения NV.

Эксперименты по измерению спектров поглощения алмазов под воздействием рентгеновского излучения проводились на Фурье-

спектрометре Bruker IFS 125HR. Метод исследования поглощения позволяет получить хорошо разрешённую структуру линий центров окраски в спектрах. К тому же, в отличие от люминесцентного метода, он позволяет количественно оценить концентрацию таких центров. Для получения спектров поглощения под воздействием рентгеновского излучения был разработан оптический криогенный модуль на базе рентгеновской трубки БСВ-30 с медным анодом, номинальная мощность трубки 500 Вт, характеристическое излучение, получаемое из рентгеновской трубки  $\text{Cu K}_\alpha$  8027 эВ. Для охлаждения образца до температуры 5 К применялся криостат замкнутого цикла Sumitomo SRP-082. В эксперименте образец, находящийся при криогенной температуре, облучали рентгеновским излучением, одновременно регистрируя спектр в оптическом диапазоне. Спектры, полученные до облучения рентгеновским излучением, сравнивались со спектрами, полученными с включенным рентгеновским источником. Затем проводилось исследование линий поглощения различных центров окраски.

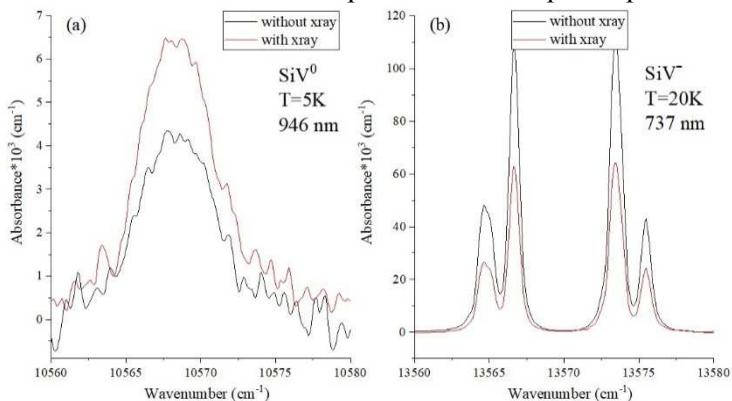


Рис. 1. Линии поглощения оптических центров  $\text{SiV}^0$ (a) и  $\text{SiV}^-$  (b).

Для образцов с NV и SiV по полученным спектрам были рассчитаны изменения концентраций дефектов  $x$  по формуле (1) из работы [1]. Калибровочные коэффициенты  $k_{zpl}$  брались из работ [1] для SiV и [2] для NV, интегральная интенсивность  $I_{zpl}$  линий поглощения находилась при помощи ПО OPUS. Часть результатов показана на Рисунках 1 и 2.

$$I_{zpl} = k_{zpl} \times x \quad (1)$$

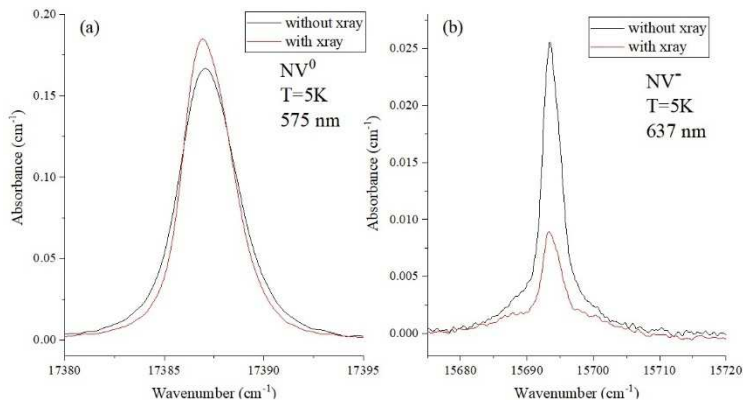


Рис. 2. Линии поглощения оптических центров  $NV^0$ (a) и  $NV^-$  (b).

Нами было обнаружено, что под воздействием рентгеновского излучения на центры окраски происходит изменение интенсивностей линий поглощения на длинах волн 946 нм ( $SiV^0$ ), 737 нм ( $SiV^-$ ), 575 нм ( $NV^0$ ) и 637 нм ( $NV^-$ ), 602 нм ( $GeV$ ). В образце с  $GeV$  также наблюдалось появление новых линий, одна из которых может быть связана с  $GeV^0$  и/или  $GeV^+$ -центрами. Для  $SiV^-$  центров видно (см. Рис. 1), что уменьшение концентрации  $SiV^-$  пропорционально увеличению концентрации  $SiV^0$ , то есть происходит зарядка  $SiV^- + e^- = SiV^0$ . Для  $NV^0$  и  $NV^-$  картина иная. Причиной этого может служить переход  $NV$ -центров в другие зарядовые состояния, например  $NV^+$ ,  $NV^{2+}$ , или же может наблюдаться более сложное взаимодействие с другими неисследованными центрами окраски (так как в образце с  $NV$  при облучении рентгеном мы наблюдаем появление новых линий поглощения, например, с длинами волн 1269 и 1059 нм).

В данной работе мы убедительно показали возможность управления зарядовым состоянием центров окраски в алмазе посредством рентгеновского излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (синтез и обработка образцов — грант №21-72-10153, спектроскопические исследования — грант №19-72-10132).

1. D'Haenens-Johansson U.F.S. et al. Phys. Rev. B. 2010, **82**, 155205.
2. Davies G. Physica B: Condens. Matter 1999, **273**, 15.

# НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АКТИВНЫЕ СРЕДЫ И НАНОСТРУКТУРЫ

## Широкодиапазонная спектроскопия монокристалла гибридного перовскита $\text{MAPbBr}_3$

Аникеева В.Е.<sup>1,2</sup>, Болдырев К.Н.<sup>1,2</sup>

*1- Институт спектроскопии*

*Российской академии наук, Троицк, Москва*

*2- «Национальный исследовательский университет*

*«Высшая школа экономики», Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-45-47

Одним из наиболее перспективных материалов для применения в солнечных элементах в настоящее время является гибридный *металлоорганический перовскит* (МОП). Структурная формула класса перовскитов –  $\text{ABX}_3$ , где в гибридных МОП катионом А является катион метиламмония ( $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ ) или формамидиния ( $\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2$ ), катионом В — Pb или Sn, а анионом X — галогены I, Br или Cl. Рекордная эффективность преобразования солнечного излучения в электрическую энергию солнечных элементов на основе МОП в 2021 году составила 25.5 % [1]. Кроме того, исследовательскими группами со всего мира показана эффективность применения МОП в таких оптоэлектронных устройствах как лазеры, фотодетекторы, светодиоды, фототранзисторы [2]. Использование гибридных перовскитов в устройствах фотовольтаики обусловлено наличием у них функциональных фотоэлектрических свойств: возможность регулирования ширины запрещённой зоны путём подбора нужного состава МОП, высокий коэффициент поглощения в видимом диапазоне, большая длина диффузии носителей заряда и их подвижность, устойчивость к дефектам и длительное время жизни в возбужденном состоянии [3]. Проведено множество исследований оптических и электронных свойств тонкоплёночных образцов этих материалов как наиболее подходящей формы для использования в оптоэлектронных устройствах [4]. Тем не менее, из-за различия в методиках синтеза и/или из-за отсутствия крупных монокристаллов хорошего качества исследование объёмных свойств МОП становится затруднительным. Исследование особенностей фонов спектра и

электрон-фононного взаимодействия позволяет объяснить природу многих фотоэлектрических свойств, важных для применения в устройствах фотовольтаики. В частности, не до конца исследована колебательная структура  $\text{MAPbBr}_3$ , а именно многофононное возбуждение кристаллической решётки.

В работе представлено спектроскопическое исследование монокристаллов  $\text{MAPbBr}_3$  ( $\text{MA} = \text{CH}_3\text{NH}_3^+$ ) в широком частотном (1800–12000  $\text{cm}^{-1}$ ) и температурном (5–300 К) диапазонах. Монокристаллы метиламмония бромид свинца были синтезированы в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова в Новосибирске. Синтез  $\text{MAPbBr}_3$  производился по разработанной методике для  $\text{MAPbI}_3$  [5] с некоторыми изменениями. Фотография полученных кристаллов представлена на вкладке к рис. 1. Для оптических измерений и исследования температурных зависимостей было использовано оборудование Института спектроскопии РАН: фурье-спектрометр высокого разрешения (в данной работе спектры были измерены с разрешением до 0.2  $\text{cm}^{-1}$ ) Bruker IFS 125HR и криостат замкнутого цикла Cryomech ST 403.

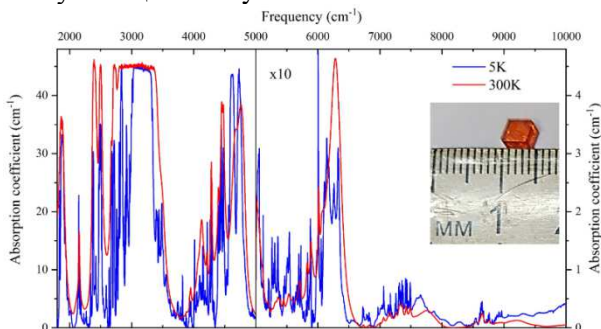


Рис. 1. Спектры поглощения монокристалла  $\text{MAPbBr}_3$  толщиной 1.4 мм при температурах 5 и 300 К в диапазоне 1800–10000  $\text{cm}^{-1}$ .

На вкладке представлена фотография исследуемого образца.

В  $\text{MAPbBr}_3$  органический катион метиламмония  $\text{MA}^+$  заключён в неорганическую решётку  $[\text{PbBr}_3]$ , что обуславливает наличие богатой колебательной структуры. Природа колебательной структуры монокристалла  $\text{MAPbBr}_3$  аналогична случаю с йодным образцом, исследованном нами ранее в работе [6]. Присутствуют несколько типов расщеплений: давидовские расщепления, инверсионные расщепления, туннелирование между двумя или более состояниями при замораживании ориентации ионов  $\text{MA}^+$ . Однако, так как атомная

масса брома меньше, чем у йода, соответствующие колебания в бромном образце смещены в более высокочастотную область. На рис. 1 представлены спектры поглощения при 5 и 300 К, исследованные в частотном диапазоне  $1800\text{--}12000\text{ см}^{-1}$ . Наблюдаются группы колебаний, связанные с крутильными, валентными, деформационными и маятниковыми колебаниями, а также их комбинациями. Можно выделить группы линий в спектрах, повторяющиеся каждые  $1500\text{ см}^{-1}$ , и при увеличении энергии их интенсивность падает. Указанные группы линий обусловлены гармониками основных колебаний, а также их комбинаций. Это говорит о сильном ангармонизме в исследуемой системе. Так, например, линия  $6296\text{ см}^{-1}$  является обертоном  $2\nu_1$  ( $2 \times 3148\text{ см}^{-1}$ ) симметричного валентного колебания  $\text{NH}_3^+$  [7].

При температурах 152 и 148 К происходят структурные фазовые переходы из тетрагональной фазы I в тетрагональную фазу II и из тетрагональной фазы II в ромбическую, соответственно. Перестроение структуры явно отражается на спектрах поглощения: изменяются параметры многих спектральных линий, а также появляются новые колебания.

Авторы выражают благодарность к.х.н. Семеновой О.И. за синтез монокристаллов перовскита  $\text{MAPbBr}_3$  и д.ф.-м.н., профессору Поповой М.Н. за помощь в обсуждении результатов. Работа выполнена в рамках в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2020–2021 г. (№ 21-04-016) и гранта РФФ № 19-72-10132.

1. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Best Research Cell Efficiency Chart, <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
2. Chen H., Wang H., Wu J., et al. *Nano Res.* 2020, **13**, 1997–2018.
3. Dey K., Roose B., Stranks S.D. *Adv. Mater.* 2021, 2102300.
4. Ndione P.F., Li Z., Zhu K.J. *Mater. Chem. C*, 2016, **4**, 7775–7782.
5. Semenova O., Yudanov E., Yeryukov N., et al. *J. Cryst. Growth.* 2017, **462**, 45–49.
6. Boldyrev K.N., Anikeeva V.E., Semenova O.I., et al. *J. Phys. Chem. C*. 2020, **124**, 42, 23307–23316.
7. Glaser T., Müller C., Sendner M., et al. *J. Phys. Chem. Lett.* 2015, **6**, 15, 2913–2918.



## Спектроскопия липидных мембран с магнитными наночастицами $\text{CoFe}_2\text{O}_4$

Астанина П.Н.<sup>1</sup>, Коплак О.В.<sup>2</sup>

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

*2- Институт проблем химической физики, Черноголовка*

*E-mail: [p\\_astanina@mail.ru](mailto:p_astanina@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-48-50

*Магнитные наночастицы* (МНЧ) находят широкое применение в области медицины, биологии и физики: МНЧ используются в качестве контрастного вещества и адресной доставке лекарств из-за своей способности накапливаться в зоне повреждения кровеносных сосудов и сердца. Любое воздействие МНЧ на биологические системы зависит от проницаемости мембран и от пористости липидного бислоя, а также от физических и химических процессов, инициируемых МНЧ в клеточных мембранах.

Целью работы является анализ изменения структуры биологического объекта – азолектиновой липидной мембраны вследствие взаимодействия с магнитными наночастицами  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , с измеренной диагональю 14 нм. Для исследования структуры молекулы традиционно используют методы ЯМР и ИК спектроскопии. Оба метода предлагают высокую точность результатов и короткое время ожидания, что делает их незаменимыми в изучении состава биологического вещества.

ЯМР — один из самых мощных методов для расшифровки структуры липидных мембран. Он основан на наличии активных ядер в атомах, составляющих молекулы липидов. На Рис. 1 Спектр  $^1\text{H}$  ЯМР липидного раствора без МНЧ (1), липидного раствора после добавления к нему МНЧ с поверхностной концентрацией, равной  $C = 6.5 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$  (2), собственно магнитных наночастиц (3). Представлен спектр  $^1\text{H}$  ЯМР липидного раствора без наночастиц (1), липидного раствора после добавления к липидному раствору магнитных наночастиц с поверхностной концентрацией, равной  $C = 6.5 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$  (2), наночастиц (3). Химический сдвиг линий у  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  групп: с

1.138 ppm на 1.341 ppm для  $\text{CH}_2$  и с 0.755 ppm на 0.926 ppm для  $\text{CH}_3$ ; также перераспределяется интенсивность при этих двух пиках: изменяется разница высот (пик, отвечающий за  $\text{CH}_3$  группу, теперь выше, нежели пик, отвечающий за  $\text{CH}_2$ ), что может означать образование водородных связей между МНЧ и липидами, вызывающее присоединение МНЧ к «хвостам» фосфолипида, и изменение структуры липидного бислоя мембраны. Заметно увеличение интенсивности у  $\text{CH}_3$  группы при 0.926 ppm.

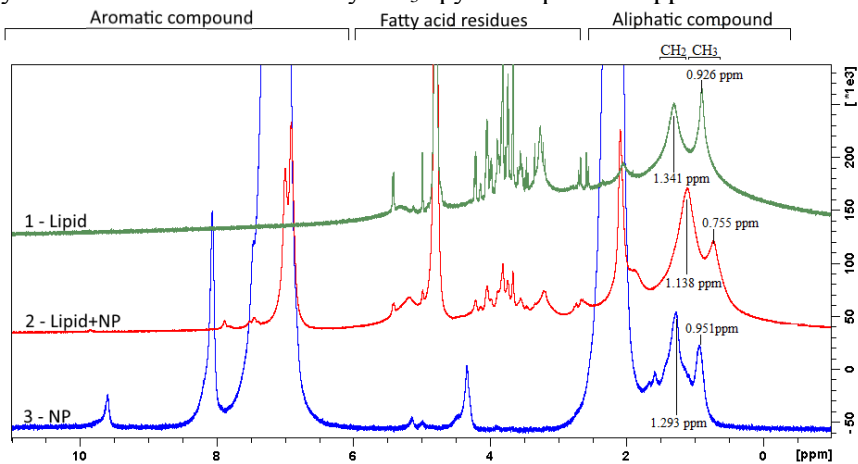


Рис. 1 Спектр  $^1\text{H}$  ЯМР липидного раствора без МНЧ (1), липидного раствора после добавления к нему МНЧ с поверхностной концентрацией, равной  $C = 6.5 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$  (2), собственно магнитных наночастиц (3).

Инфракрасная (ИК) микроскопия используется для регистрации инфракрасных спектров поглощения, пропускания и отражения веществ, основана на явлении поглощения веществом электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне и считается одним из лучших методов проведения биологического анализа. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** изображен ИК спектр пропускания: для МНЧ (1), липида после добавления МНЧ с поверхностной концентрацией  $C = 6.5 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$  (2). Сравнение относительных интенсивностей линий в спектрах 1 и 2 показывает их перераспределение между группами Fe–O, Co–O и Fe–OH. Растворение МНЧ в мембране вызывает уменьшение линий интенсивности, соответствующих

связям Fe–O, Co–O и приводит к увеличению интенсивности линий Fe–OH. Увеличение интенсивности линии Fe–OH обусловлено связыванием МНЧ с водородом, принадлежащим к липиду.

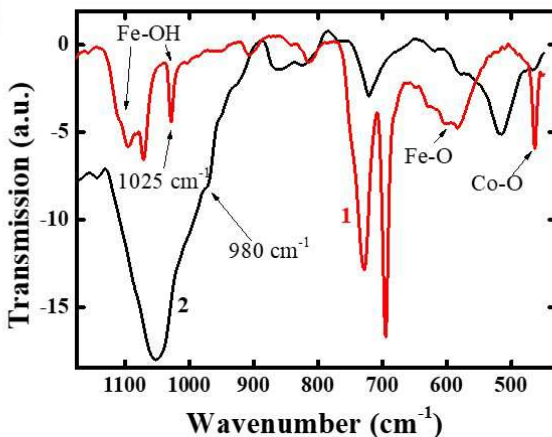


Рис. 2 ИК спектр пропускания: 1 — МНЧ, 2 — липида после добавления МНЧ с поверхностной концентрацией  $C = 6.5 \cdot 10^6 \text{ мм}^{-2}$ .

Слои, в которых расположены хвосты молекул липидов, демонстрируют изменения в ИК спектрах при волновых числах  $980 \text{ см}^{-1}$  и  $1025 \text{ см}^{-1}$ , соответствующих образованию связей Fe–OH, Co–O и Fe–C–H. Увеличение интенсивности линии Fe–OH обусловлено связыванием МНЧ с водородом, принадлежащим к липиду. Перераспределение интегральных интенсивностей линий в спектрах ЯМР указывает на структурные изменения липидной мембраны. Образование водородных связей между МНЧ и липидом подтверждается методом NOESY из-за того, что в структуре, измененной МНЧ, происходит дезкранирование близко расположенных ядер  $^1\text{H}$ .

Добавление  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  к азолектиновой липидной мембране изменяет ее структуру, и МНЧ присоединяются к эфирным атомам кислорода в липиде.

## Исследование структуры и физических свойств электроформованных мембран

**Багров Д.В.<sup>1,2</sup>, Павлова Е.Р.<sup>1,2</sup>**

*1- Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Москва*

*2- Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины  
Федерального Медико-биологического Агентства, Москва*

*E-mail: [bagrov@mail.bio.msu.ru](mailto:bagrov@mail.bio.msu.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-51-52

Мембраны, сформированные методом электроспиннинга (электроформования) находят применение в качестве фильтров, сорбентов, а также в биомедицине — в качестве раневых покрытий, субстратов для культивирования клеток и систем высвобождения лекарств. Особенность электроформованных мембран заключается в том, что они состоят из сравнительно тонких волокон с диаметрами менее 1 мкм (типично 100–500 нм). Это меньше, чем при использовании большинства других методов, основанных на сцеплении экструдированных волокон с диаметрами 10–100 мкм. При электроспиннинге волокна формируются в сильном электрическом поле, которое растягивает заряженную струю полимерного раствора. Малый диаметр волокон приводит к тому, что состоящие из них мембраны обладают необычными свойствами, в частности, они обычно гидрофобны за счёт высокой поверхностной доли пор.

В данной работе мы исследовали структуру и смачиваемость электроформованных мембран, изготовленных из различных полимеров – полилактида, нейлона-6, нейлона-11. Мы определили краевые углы смачиваемости поверхности водой, а для мембран из полилактида провели механические испытания на разрыв.

Метод *сканирующей электронной микроскопии* (СЭМ) повсеместно используется для изучения структуры и контроля качества электроформованных мембран. Мы использовали СЭМ для измерения диаметров волокон мембран и доли поверхности, занятой порами. Для всех исследованных нами образцов средние диаметры волокон лежали в диапазоне 150–300 нм, типичная доля пор на поверхности составляла 65–80 %.

Мембраны из нейлона-6 были хорошо смачиваемы и

впитывали в себя воду, а мембраны из нейлона-11 и полилактида имели высокую гидрофобность (краевые углы смачивания составляли  $(126\pm 2)^\circ$  и  $(130\pm 5)^\circ$  соответственно). Высокая смачиваемость нейлона-6 обеспечивает беспрепятственное проникновение жидкости в поры мембраны. Это позволяет использовать её в качестве фильтра или проводить адсорбцию веществ, растворенных в воде, на поверхность волокон. Можно ли модифицировать мембраны, изготовленные из нейлона-11 и полилактида, чтобы они также стали гидрофильными? Мы показали, что это может быть достигнуто путём обработки мембран в кислородной плазме.

Высокие краевые углы смачивания, которые наблюдаются в исследованиях электроформованных мембран, обычно объясняют с помощью модели Кэсси-Бакстера [1]. В то же время, для описания протекания жидкости через электроформованную мембрану необходимы более сложные модели [2]. При описании движения фронта жидкости через мембрану они должны учитывать, что проникновение жидкости в пору, образованную парой волокон, — это вероятностный процесс, причём вероятность зависит от материала волокон, их диаметров и расстояния между ними.

Высокая пористость электроформованных мембран позволяет быстро вводить в них пластификатор. Это было показано нами на примере полилактида и этанола, который увеличивает удлинение мембран при разрыве с  $(49\pm 13)\%$  до  $(110\pm 42)\%$  [3]. Подобная пост-обработка мембран модификаторами может использоваться в промышленности для улучшения механических свойств.

Дальнейшее развитие технологии электроспиннинга и исследование свойств электроформованных мембран позволит расширить имеющийся спектр их применений. Возможности улучшения эластичности и гидрофильности, продемонстрированные в данной работе, могут быть востребованы в специализированных приложениях, например, в разработке биосенсоров.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 21-74-10042.

1. Bagrov D., Perunova S., Pavlova E., et al. RSC Adv. 2021, **11**(19), 11373–11379.
2. Søggaard E., Andersen N.K., Smistrup K., et al. Langmuir, 2014, **30**(43), 12960–12968.
3. Pavlova E.R., Bagrov D.V., et al. Mater. Des., 2019, **181**, 108061.

## Интерференция Фано в легированных наноалмазах, терминированных водородом

**Кудряцев О.С., Ромшин А.М., Пастернак Д.Г.**

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

*E-mail: leolegk@mail.ru*

DOI:10.24412/c1-35673-2021-1-53-55

В конце прошлого столетия в алмазе были обнаружены уникальные для полупроводников свойства: такие как отрицательное сродство к электрону и высокая поверхностная электропроводность  $p$ -типа. Оба свойства проявляются при «наводороживании» поверхности алмаза. Поверхностная электропроводность обусловлена переносом электрона от наводороженной поверхности алмаза, в слой адсорбированной воды, с последующим накоплением дырок в приповерхностном слое алмаза и изгибу вверх максимума валентной зоны [1]. При малой толщине приповерхностного слоя (не более 1 нм), получаем относительно высокую концентрацию свободных дырок  $10^{19}$ – $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. При столь высоких концентрациях свободных носителей в легированных полупроводниках наблюдается интерференция типа Фано [2] между дискретными состояниями оптических фононов и континуумом примесных электронных (дырочных) состояний. Эта интерференция проявляется в асимметричном профиле фононных линий в спектрах комбинационного рассеяния сильнолегированных полупроводников, включая алмазы, легированные бором [3]. Эффект Фано наблюдался ранее при ИК-поглощении кремния и германия, содержащих большую концентрацию акцепторных примесей [4]. Естественно предположить аналогичную интерференцию типа Фано в приповерхностной области сильнонаводороженного алмаза, с высокой концентрацией свободных носителей. В отсутствие примесей его решетка остаётся совершенной, что обеспечивает высокую добротность фононного осциллятора и, как следствие, усиление эффекта интерференции связанных осцилляторов (интерференции Фано). *Наноалмазы* (далее НА) с размером около 30 нм являются оптимальными для обнаружения интерференции

Фано в наводороженном алмазе [5].

Целью данного исследования был поиск интерференции Фано при ИК-поглощении в наноалмазах со средними размерами 30 нм, синтезированных термобарической обработкой чистого адамантана.

Спектр поглощения (см. рис.) имеет необычные для ИК-поглощения алмаза особенности:

- узкий провал поглощения на частоте  $1328 \text{ см}^{-1}$ ,
- фоновое поглощение неуклонно возрастает в сторону низких частот (начиная с  $6000 \text{ см}^{-1}$ ).

При отжиге образца на воздухе при  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  значительное ослабление ИК-поглощения  $\text{CН}_x$  группами на поверхности алмаза сопровождается уменьшением фонового поглощения и пика прозрачности. Эти изменения демонстрируют связь пика прозрачности и широкополосного поглощения с водородом, на поверхности НА. Фоновое поглощение может быть обусловлено континуумом дырочных состояний, а пик прозрачности при  $1328 \text{ см}^{-1}$  — деструктивной интерференцией между дырками и оптическими фононами в алмазе. Ближайшим аналогом этой интерференции может быть эффект индуцированной парным резонатором прозрачности [6]. В подобном парном резонаторе деструктивная интерференция является результатом внутренней связи между отдельными резонаторами. Важным условием проявления данного эффекта является разница в добротностях связанных резонаторов, которое выполняется в случае наноалмазов с наводороженной поверхностью, так как добротность фононного осциллятора намного выше, чем у дырочного.

Результатом исследования сильнонаводороженных наноалмазов является узкая полоса прозрачности на частоте  $1328 \text{ см}^{-1}$  в ИК-спектрах поглощения 30 нм частиц алмаза. Мы связываем этот необычный для чистого алмаза эффект с деструктивной интерференцией типа Фано между оптическими фононами в алмазе и носителями заряда, возникающими в приповерхностном слое наводороженного НА. Деструктивная интерференция объясняется простой моделью двух связанных осцилляторов, один из которых взаимодействует с внешним электромагнитным полем. Обнаруженная фононно-плазменная связь в НА с водородными концевыми группами позволяет предположить, что при достижении высоких локальных концентраций дырок такие НА могут быть

сверхпроводящими, подобно алмазу, легированному бором на уровне  $>10^{21} \text{ см}^{-3}$  [7]. Резкий провал поглощения вблизи частоты оптического фонован приводит к аномальной дисперсии света в этой области. Материалы с этим свойством способны уменьшать групповую скорость проходящего света [8]. Таким образом, наводороженные НА можно использовать для управления скоростью импульсов ИК-излучения. В целом обнаружение пика ИК-прозрачности, вызванного фононно-плазмонным взаимодействием, открывает новую страницу в исследовании и применении алмаза в инфракрасном оптическом диапазоне.

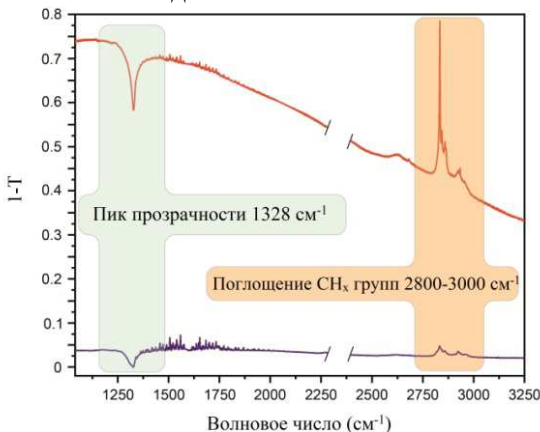


Рис. 1 Спектр ИК-поглощения 30 нм наноалмазами, синтезированными из чистого адамантана.

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

1. Maier F., Riedel M., Mantel B., et al. *Phys. Rev. Lett.* 2000, **85**, 3472–3475.
2. Fano U. *Phys. Rev.* 1961, **124**, 1866–1878.
3. Pruvost F., Deneuille A. *Diam. & Relat. Mat.* 2001, **10**, 531–535.
4. Humlíček J. *Thin Solid Films.* 1998, **313–314**, 656–660.
5. Bolker A., Saguy C., Kalish R. *Nanotechnology.* 2014, **25**, 385702.
6. Lamb W.E., Retherford R.C. *Phys. Rev.* 1951, **81**, 222.
7. Ekimov E.A., Sidorov V.A., Bauer E.D. *Nature.* 2004, **428**, 542–545.
8. Hau L.V., Harris S.E., Dutton Z. *Nature.* 1999, **397**, 594–598.



## Выращивание алмазных композитов в СВЧ плазме для визуализации жёсткого рентгеновского излучения

**Мартьянов А.К.<sup>1</sup>, Седов В.С.<sup>1</sup>**

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

*E-mail: [martyanov@nsc.gpi.ru](mailto:martyanov@nsc.gpi.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-56-57

Разработка мощных рентгеновских лазеров на свободных электронах (XFEL) поставила задачу синтеза стойких сцинтилляционных материалов для визуализации жёсткого рентгеновского излучения [1]. Алмаз — уникальный материал, способный выдерживать высокие дозы радиации и тепловые нагрузки. Церий обладает интенсивной рентгенолюминесценцией в видимом диапазоне с наносекундным временем затухания [2, 3]. Композит алмаз-YAG:Ce уже показал рентгенолюминесценцию  $\text{Ce}^{3+}$  с наносекундным временем затухания, но содержание церия в твердом растворе YAG:Ce не было оптимизировано [4].

В данной работе были получены наночастицы с оптимизированным составом и внедрены в матрицу поликристаллического алмаза с образованием композитного материала алмаз-YAG:Ce (рис. 1).

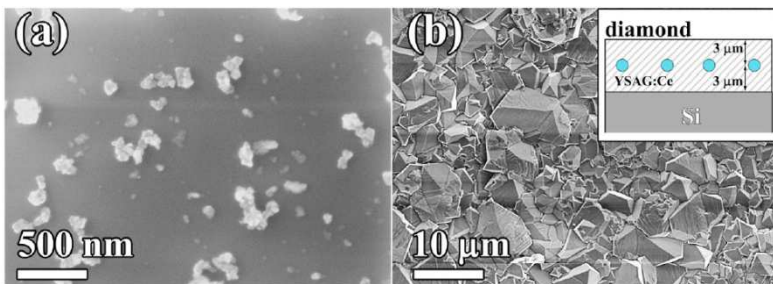


Рис. 1. РЭМ: агломераты наночастиц YAG:Ce на подложке (а) и поликристаллическая алмазная поверхность композита(б).

Вставка: поперечное сечение композита.

Получение композита производилось в три этапа. Полированные монокристаллические кремниевые пластины,

используемые в качестве подложек, засеивались детонационными наноалмазами со средним размером частиц 5 нм из суспензии на водной основе. Затем химическим осаждением из метан-водородной СВЧ-плазмы в реакторе ARDIS 100 (2.45 ГГц) выращивалась первичная микрокристаллическая алмазная плёнка толщиной 2 мкм. На втором этапе сформированная алмазная плёнка засеивалась наночастицами YAG:Ce из водной суспензии с использованием центрифуги. На третьем этапе образцы повторно зарастивались алмазом до полной интеграции наночастиц.

Была зарегистрирована рентгенолюминесценция при возбуждении полученных композитов рентгеновской трубкой с вольфрамовым анодом (рис. 2).

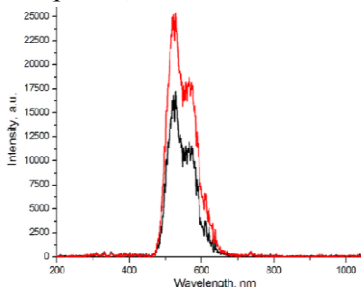


Рис. 2. Спектр рентгенолюминесценции алмазных композитов с внедрёнными наночастицами YAG:Ce.

Таким образом, создан алмазный композит с регулируемым химическим составом встроенных люминесцентных наночастиц. Такой класс композитов представляет собой инструмент для разработки новых материалов с желаемыми свойствами для широкого круга применений, включая обнаружение и визуализацию интенсивного рентгеновского излучения.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 20-32-70074).

1. T. Pikuz et al. Sci. Rep. 2015, **5**, 17713.
2. S. Witkiewicz-Lukaszek, et al. Cryst. Growth Des. 2018, **18**, 1834–1842.
3. A. Khan, et al. J. Alloys Compd. 2018, **741**, 878–882.
4. V. Sedov, et al. Carbon. 2021, **174**, 52–58.

## Проводимость и термоэлектрические коэффициенты допированного титаната стронция при высоких температурах

**Назарян Х.Г.**

*Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет), Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-58-60

Развита теория проводимости и термоэлектрических эффектов в допированном титанате стронция  $\text{SrTiO}_3$  в невырожденной области температур  $k_B \gg E_F$ . Главным источником диссипации предполагается рассеяние электронов на мягких поперечных оптических фононах, связанных с близостью этого материала к сегнетоэлектрическому переходу. Мы использовали кинетическое уравнение в приближении времени релаксации и определили зависящее от энергии время релаксации  $\tau(E)$  через метод итераций. Используя эффективную массу электрона  $m$  и константу взаимодействия электрона с поперечными фононами  $\lambda$  в качестве двух подгоночных параметров, мы смогли количественно описать температурные зависимости удельного сопротивления  $R(T)$  и коэффициента Зеебека  $S(T)$  для широкого диапазона электронных плотностей, исследованных экспериментально в недавней работе [1]. Кроме того, мы рассчитали отношение Нернста в линейном приближении по слабому магнитному полю в том же диапазоне температур.

Разбавленный трехмерный металл, образующийся из зонного изолятора титаната стронция (STO) из-за крошечного легирования ( $10^{-6}$ – $10^{-4}$  электронов проводимости на элементарную ячейку), демонстрирует ряд довольно необычных свойств [2, 3]. Их основная общая причина — необычно сильное приближение изолирующего STO к сегнетоэлектрическому переходу, что приводит к гигантской низкотемпературной диэлектрической проницаемости  $\epsilon(0) \approx 20000$ . В результате кулоновское взаимодействие между электронами проводимости практически исчезает, и стандартная феноменология, разработанная в теории нормальных металлов, неприменима. Низкая плотность электронов проводимости  $n$  и возможность её подстраивания позволяют изучать транспортные свойства

легированного STO в различных температурных режимах, от сильно вырожденного ферми-газа при  $k_B T \ll E_F$  до сильно невырожденного при  $k_B T \gg E_F$ , где  $E_F$  — энергия Ферми.

В настоящей работе мы теоретически пересматриваем вопрос об электропроводности и термоэлектрическом отклике в невырожденном электронном газе, взаимодействующем с мягкими поперечными оптическими фононами. Этот тип фононов существует в STO из-за близости к сегнетоэлектрическому переходу. Мы используем подход кинетического уравнения в форме в приближении времени релаксации и выражаем как удельное сопротивление  $R(T)$ , так и коэффициент Зеебека  $S(T)$  через зависящее от энергии время транспортного рассеяния  $\tau(E; T)$ .

Наша цель — развить простую модель рассеяния электронов, приводящую к хорошему согласию с данными в высокотемпературной области  $k_B T \gg E_F(n)$  как для проводимости  $\sigma(T)$ , так и для коэффициента Зеебека  $S(T)$ . Итак, мы развиваем полуколичественную теорию, основанную на простейшей модели параболического электронного спектра  $E(p) = p^2/2m$  с зависящей от температуры эффективной массой  $m = m(T)$ .

Результаты проделанной работы очень хорошо описывают экспериментальные данные для сопротивления и коэффициента Зеебека с относительной ошибкой меньше 10 % во всём изучаемом диапазоне температур и для всех концентраций одновременно (см. Рис. 1).

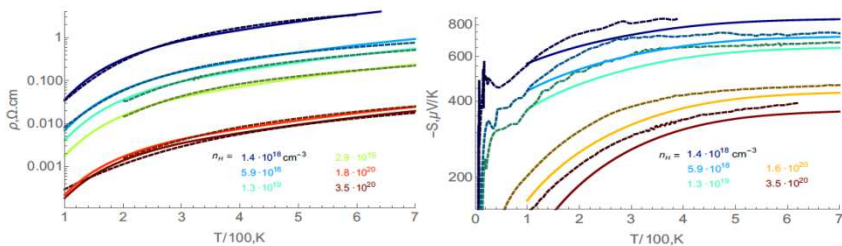


Рис. 1. Сравнение экспериментальных (пунктирные) и теоретических (сплошные) кривых для сопротивления (слева) и коэффициента Зеебека (справа)

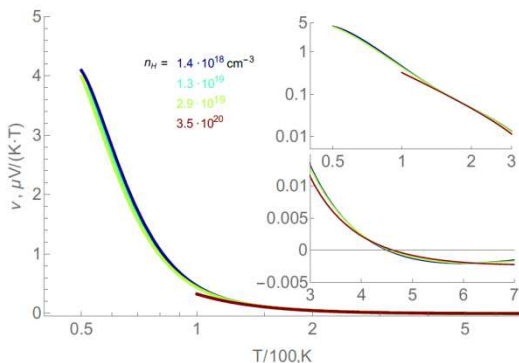


Рис. 2. Теоретические предсказания для поведения коэффициента Нернста.

Также, мы смогли теоретически предсказать поведение коэффициента Нернста в невырожденной области температур (рис. 2). Он перестаёт зависеть от температуры при  $T > 150$  К, а при 450 К меняет свой знак.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Фейгельману М.В.

1. Collignon C., Bourges P., Fauque B., et al. Phys. Rev. X. 2020, **10**, 031025.
2. Gastiasoro M.N., Ruhman J., Fernandes R.M. Annals of Physics. 2020, **417**, 168107.
3. Collignon C., Lin X., Rischau C.W., et al. Annual Review of Condensed Matter Physics. 2019, **10**, 25.

## Оптические свойства 3-А графеновых нанополосок

**Новиков И.В.<sup>1,2</sup>, Федотов П.В.<sup>1,2</sup>, Рыбковский Д.В.<sup>3</sup>**

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

2- *Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет), Москва*

3- *Сколковский институт науки и технологий, Москва*

E-mail: [novikov.ivan@phystech.edu](mailto:novikov.ivan@phystech.edu)

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-61-62

Углеродные материалы и, в частности, узкие *нанополоски графена* (НПГ) интересны из-за своих оптических и электрических свойств, сильно зависящих от их размера и структуры. Потенциально данный материал может найти широкое применение в транзисторах, термоэлектрических устройствах и накопителях. Основной характеристикой материала является запрещенная зона. По ней НПГ делят на три семейства:  $3p$ ,  $3p+1$  и  $3p+2$ , в зависимости от количества атомов в поперечном сечении. С ростом числа атомов в поперечном сечении в каждом семействе ширина запрещенной зоны монотонно убывает. [1] Именно поэтому так важно контролировать структурные параметры НПГ на атомарном уровне.

Обычно синтез НПГ производится на основе подхода «снизу-вверх» методом *газохимического осаждения* (ГХО) прекурсора на кристаллическую поверхность Au (111) под высоким или сверхвысоким вакуумом. [2] Однако, в нашей работе мы демонстрируем синтез на подложке из никелевой фольги под вакуумом порядка  $10^{-3}$  мбар. Высокое качество полученных НПГ было проверено с помощью спектров *комбинационного рассеяния* (КР). Для исследования выращенных плёнок, взвешенных в растворителях, были применены методы спектроскопии *оптического поглощения света* (ОПС) и спектрального картирования возбуждения фотолуминесценции.

Плёнки, синтезированные из молекул 4,4"-dibromo-p-terphenyl (ДВТР) путем отжига при 250 °С, а также образцы, дополнительно отожжённые при 350–400 °С, обладают специфическими спектрами при возбуждении в ультрафиолетовом диапазоне светом с длиной волны 325 нм. (рис. 1) Особенности КР хорошо согласуются с теоретически рассчитанными модами колебаний нанополосок

шириной в 3 атома с ребром в т.н. «форме кресла» (3-АНПГ). Наиболее интенсивной модой является G-мода НПГ, расположенная на частоте  $1605\text{ см}^{-1}$  и связанный с режимом растяжения углеродного кольца. Однако плёнки, дополнительно отожжённые при  $450\text{ °C}$ , имеют пик при  $1350\text{ см}^{-1}$ , который отнесён к индуцированной дефектами D-моды. Её появление указывает на дефектную структуру НПГ, связанную с частичным боковым слиянием нанополосок.

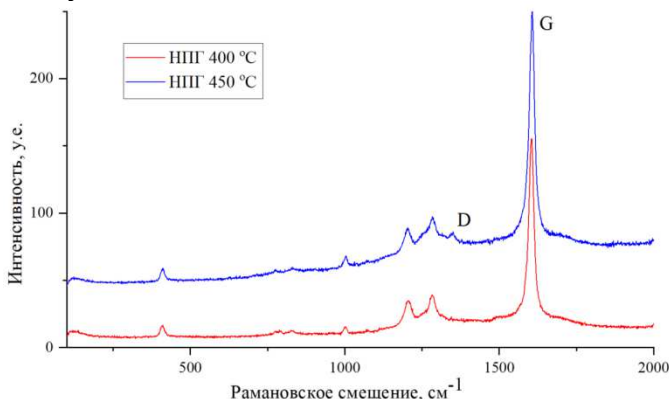


Рис. 1. Типичные спектры КР образцов нанополосок графена (НПГ). Образцы были отдельно отожжены при  $250\text{ °C}$  с последующей термообработкой при  $400$  (красный) и  $450\text{ °C}$  (синий спектр).

Итак, модифицированный метод ГХО был использован для масштабирования синтеза атомарно точных 3-АНПГ в условиях низкого вакуума. Спектроскопия КР подтверждает точность произведённых образцов. Были зарегистрированы все ожидаемые колебательные моды КР, соответствующие 3-АНПГ. Мы полагаем, что результаты, полученные в рамках исследования синтезированных 3-АНПГ, будут способствовать дальнейшему исследованию и практическому применению данного типа углеродных наноматериалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60006 и РНФ в рамках проекта № 20-42-08004.

1. Talirz L., Ruffieux P., Fasel R. *Advanced materials* 2016, **28**, 6222–6231.
2. Narita A., Chen Z., Chen Q., et al. *Chemical science* 2019, **10**, 964–975.

## Инженерия центров окраски германий-вакансия в алмазе

**Седов В.С.<sup>1</sup>, Мартьянов А.К.<sup>1</sup>, Хомич А.А.<sup>2</sup>**

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

*2- Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова  
Российской академии наук, Фрязино*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-63-64

В последнее время большой интерес вызывает создание и исследование однофотонных эмиттеров на основе фотоактивных центров (центров окраски) в алмазе [1]. Ряд центров окраски в алмазе, таких как германий-вакансия Ge–V, обладает высокими яркостью, квантовой эффективностью и стабильностью при комнатной температуре, короткими излучательными временами жизни и узкими линиями, что открывает перспективы для создания алмазных однофотонных эмиттеров для квантовых оптических исследований, обработки информации, криптографии и наноразмерной магнитометрии, а также для использования в качестве оптических биомаркеров и локальных датчиков температуры [2]. Алмаз, равномерно и контролируемым образом легированный германием, можно синтезировать методом *химического осаждения из газовой фазы* (англ. *Chemical Vapor Deposition, CVD*) в СВЧ плазме в газовых смесях «метан-водород-герман» [3], однако эффективность встраивания германия в алмаз из газовой фазы до сих пор остаётся неизвестной. К тому же, важной задачей является контролируемая инженерия распределения центров окраски по синтезируемому образцу [4].

Синтез поликристаллических алмазных пленок производился на подложках Si в СВЧ плазме в реакторе ARDIS-100 (2.45 ГГц, 5 кВт), в газовой смеси CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> (+GeH<sub>4</sub>) при общем расходе газа 500 станд.см<sup>3</sup>/мин и СВЧ мощности 5.0 кВт. Варьирование давления в камере (63–94 торр для разных образцов) использовалось для изменения температуры подложки во время синтеза. Концентрация метана по отношению к водороду CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> поддерживалась постоянной: 4 %. Концентрация германа в камере по отношению к метану (GeH<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub>) составляла 10 %. Температура подложки во время синтеза для разных образцов составляла от 750 до 950 °С. Толщина



всех синтезированных плёнок контролировалась во время CVD-процесса методом лазерной интерферометрии [5] и по завершению роста составляла  $(5 \pm 0.5)$  мкм.

Наличие различных углеродных фаз и эффективность образования Ge–V центров в исследуемых образцах определялись с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и фотолюминесценции (ФЛ) на установке LABRAM HR-800 с использованием возбуждающего излучения твердотельного лазера на длине волны 473 нм. В спектре КР синтезированных плёнок наблюдается характерный для алмаза узкий пик на частоте  $1332 \text{ см}^{-1}$ . В спектре ФЛ линия на длине волны 602 нм связана с эмиссией Ge–V центров. Установлено, что интенсивность ФЛ центров Ge–V в синтезированных плёнках немонотонно зависит от температуры подложки во время синтеза (Рис. 1). В частности, экспериментально обнаружен воспроизводимый аномальный локальный минимум интенсивности ФЛ при температуре подложки  $850 \text{ °C}$ . Полученные данные будут в дальнейшем использованы для инженерии центров окраски Ge–V при синтезе легированных германием поликристаллических и эпитаксиальных монокристаллических алмазных плёнок.

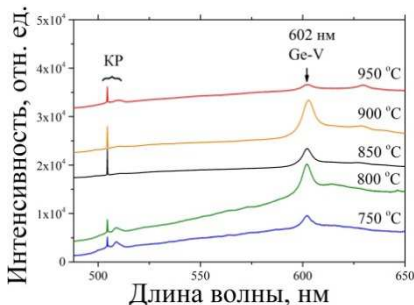


Рис. 1. Спектры ФЛ поликристаллических алмазных плёнок, синтезированных в смесях «метан-водород-герман» при различных температурах подложки.

Работа поддержана грантом РНФ № 21-72-10153.

1. Ralchenko V.G., Sedov V.S., Martyanov A.K. et al. ACS Photonics. 2018, **6**, 66–72.
2. Romshin A.M., Zeeb V., Martyanov A.K. et al. Sci Rep. 2021, **11**, 14228.
3. Sedov V., Martyanov A., Savin S. et al. Diam. Relat. Mater. 2018, **90**, 47–53.
4. Ralchenko V., Sedov V., Saraykin V. et al. Appl. Phys. A 2016, **122**, 1–6.
5. Sedov V.S., Martyanov A.K., Khomich A.A. Diam. Relat. Mater. 2020, **109**, 108072.

## Исследование насыщаемого поглощения в тонких пленках MXene

**Семиренченков А.А.<sup>1</sup>, Худяков Д.В.<sup>1</sup>, Бородкин А.А.<sup>2</sup>,  
Чертопалов С.<sup>3</sup>, Lancok J.<sup>3</sup>, Olshtrem A.<sup>4,5</sup>, Lyutakov O.<sup>4,5</sup>**

*1- Центр физического приборостроения  
института общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук, Москва*

*2- Institute of Photonics and Electronics  
of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic*

*3- Institute of Physics  
of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic*

*4- Department of Solid State Engineering,  
University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic*

*5- Исследовательская школа химических и биомедицинских  
технологий, Томский политехнический университет, Томск*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-65-67

Наиболее часто используемые устройства для пассивной синхронизации мод в лазерах ультракоротких импульсов — это зеркала с полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SESAM), однако процесс их изготовления сложен, дорог и ограничен полупроводниковыми материалами. Эти устройства хорошо работают только в ближнем инфракрасном диапазоне.

Перечисленные ограничения стимулируют поиск новых материалов для применения в качестве насыщающихся поглотителей (НП). В 2003 г. впервые сообщалось о НП, включающих углеродные нанотрубки (УНТ) [1]. В 2009 г. графен был использован в волоконных лазерах с синхронизацией мод [2]. С тех пор особый интерес был сосредоточен на наноматериалах.

В последнее время быстро растет интерес к 2D материалам на основе MXene соединений. Эти наноматериалы представляют собой карбиды, карбонитриды и нитриды переходных металлов с двумерной слоистой структурой, напоминающей тонкие листы, уложенные друг на друга [3].

Общая химическая формула материалов MXene:  $M_n+1X_nT_x$

( $n = 1-3$ ), где М представляет собой переходный металл (Sc, Ti, Zr, Nb, Cr, Mo и т. д.), X представляет собой углерод или азот, Т представляет собой поверхностные окончания (например,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{O}$  или  $-\text{F}$ ), а  $x$  — количество концевых групп.

$\text{MXenes}$  (или максены) демонстрируют повышенный коэффициент пропускания при высоких интенсивностях света [4]. НП на основе пленок  $\text{MXene Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  успешно применяются в волоконных лазерах [5].

В этой статье мы исследуем свойства насыщаемого поглощения  $\text{MXenes}$ -соединений, полученных путём осаждения тонких пленок  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  на предметное стекло ( $1 \times 26 \times 76$  мм) *методом химического осаждения из раствора* (Interface Method). Нашим исследуемым веществом был химически модифицированный  $\text{Ti}_3\text{C}_2$   $\text{MXene}$  в соединении с акцептором электронов *m*-динитробензолом ( $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{-di-NO}_2$ ).

Чтобы получить очень тонкие и однородные плёнки, мы использовали простой и эффективный метод образования межфазной плёнки между двумя несмешивающимися жидкостями (а именно, водой и толуолом), который ранее использовался в [6] для получения тонких  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  пленок  $\text{MXene}$  (толщиной  $h$  в диапазоне 5–100 нм).

Для исследования нелинейно-оптических свойств тонких плёнок мы использовали метод *Z*-сканирования с открытой апертурой.

Образец помещался на подвижную платформу, траектория движения которой проходила через перетяжку сфокусированного лазерного луча. В нашем эксперименте использовался лазерный луч фемтосекундного волоконного лазера с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса 400 фс и максимальной энергией импульса 1.5 мкДж. Частота лазерных импульсов в наших измерениях составляла 10 кГц. Выходная энергия импульса могла изменяться выставлением на пути лазерного луча различных комбинаций из нейтральных фильтров. Далее луч, пройдя через линзу с фокусным расстоянием 12 см, попадал на наш образец. Пройдя через образец, луч попадал на фотодиодный измеритель мощности. Таким образом, мы могли наблюдать изменение мощности проходящего через образец излучения в зависимости от положения пленки  $\text{MXene}$  относительно фокуса линзы, соответственно в зависимости от интенсивности падающего на образец лазерного луча.

В результате мы получили сигнал просветления в нашем образце при достаточно большой пиковой интенсивности лазерного пучка, как показано на графике (Рис. 1).

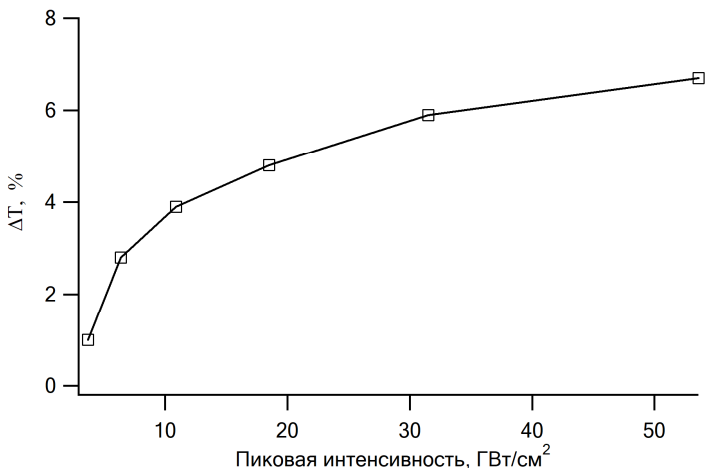


Рис. 1. Кривая зависимости изменения пропускания плёнки  $Ti_3C_2-di-NO_2$  от пиковой интенсивности лазерного пучка.

В результате максимальная глубина модуляции плёночного образца  $Ti_3C_2-di-NO_2$  оказалась равной 6 %, что сравнимо с глубиной модуляции таких наноматериалов, как УНТ или графен. Следует также отметить, что образец не разрушался при достижении пиковой интенсивности падающего излучения  $50 \text{ ГВт/см}^2$ , что является несомненным достоинством наших пленок MXene.

1. Set S.Y., Yaguchi H., Tanaka Y., et al. *Lightwave Technol.* 2004, **22**, 51–56.
2. Zhang H., Tang D.Y., Zhao L.M., et al. *Opt. Express.* 2009, **17**, 17630.
3. Shein I.R. and Ivanovskii A.L. *Micro & Nano Lett.* 2013, **8**, 59–62.
4. Hantanasirisakul K., Gogotsi Y. *Adv. Mater.* 2018, **30**, 1804779.
5. Wu Q., Jin X., Chen S., et al. *Opt. Express.* 2019, **27**, 10159.
6. Dong Y., Chertopalov S., Maleski K., et al. *Adv. Mater.* 2018, **30**, 1705714.

## Исследование аномальной двуосности в монокристаллах шеелитов в зависимости от способа их получения из расплава

**Цилих А.Д., Дунаева Е.Э.**

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

*E-mail: [alecat0501@gmail.com](mailto:alecat0501@gmail.com)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-68-70

Монокристаллы вольфраматов щелочноземельных металлов известны как эффективные быстродействующие сцинтилляторы и акустооптические материалы [1, 2]. Исследования последних лет позволили установить, что эти материалы являются и одним из наиболее перспективных классов ВКР-активных сред, то есть сред, способных преобразовывать длину волны лазерного излучения за счёт *вынужденного комбинационного рассеяния* (ВКР) света. Легированные кристаллы могут выполнять одновременно и функции лазерной среды. Такие многофункциональные лазерно-рамановские материалы позволяют генерировать мощное когерентное излучение на новых длинах волн и осуществлять дискретную перестройку частоты излучения.

Требования к оптическому совершенству материалов, используемых в лазерной технике, исключительно высоки. Кристаллы, используемые в лазерных устройствах, не должны содержать газообразных включений, трещин или твёрдых частиц, границ блоков. Градиенты показателя преломления среды не должны превышать величин  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  см<sup>-1</sup>. ВКР-кристаллы, которые зачастую работают при предельно высоких интенсивностях лазерного излучения,  $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, должны удовлетворять всем вышеперечисленным требованиям, поскольку присутствие в оптической среде ростовых дефектов приводит к потерям света (часть его рассеивается) и к лазерному разрушению материала [3].

В настоящей работе кристаллы ВаWO<sub>4</sub> были выращены методом Чохральского из расплава и свободны от трещин, границ блоков и пузырей (рис. 1). Химический состав полученных

кристаллов, по данным масс-спектрометрии, однороден и соответствует стехиометрическому.



Рис. 1. Монокристаллы  $BaWO_4$ .

Исследования неоднородности показателя преломления выращенных кристаллов проводились на поляризационном микроскопе МИН – 8 с пятикратным окуляром и девятикратным объективом. В одноосных кристаллах напряжения, возникшие в плоскости перпендикулярной оси кристалла  $c$ , вызывают появление аномальной двуосности, которую легко наблюдать в сходящемся поляризованном свете (метод коноскопии). Для исследований аномальной двуосности кристаллов поверхности, перпендикулярные оптической оси кристалла, были отполированы до 12–14 класса. Измерения  $\text{grad } n$  ( $\Delta/L$ ) проводились на образцах 1 см толщины.

При наблюдении картин в сходящемся белом свете кристалл помещается на столик поляризационного микроскопа между скрещенными поляризаторами. Для исследования аномальной двуосности кристалл устанавливается так, чтобы оптическая ось прибора совпадала с острой биссектрисой угла оптических осей.

Расстояние между выходами оптических осей  $D$  измерялись по микрометрической линейке окуляра. Угол между оптическими осями  $2V$  определяли, исходя из формулы (1):

$$\sin V = (KD/n_m), \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент, характеризующий оптическую систему микроскопа (постоянная Малляра),  $D$  — измеренное количество делений окуляр-микрометра между выходами оптических осей,  $n_m = 1.8509$  — среднее значение  $n_o$  для  $BaWO_4$  в видимом диапазоне спектра [4]. Для определения  $K$  использовался эталонный образец слюды — флогопита, для которого  $n_m \approx n_o = 1.55$ ,  $2V = 10^\circ 30'$ ,  $D = 20$ .

Аномальное двулучепреломление  $\Delta = n_1 - n_2$  рассчитывалось по формуле (2):

$$\Delta = (n_o - n_e) \cdot \sin^2 V. \quad (2)$$

Угол оптических осей может меняться в различных участках выращенных кристаллов, поэтому для характеристики кристалла в целом  $D$  измерялось в различных его частях путём перемещения столика микроскопа, фиксировались полученные значения с учётом поворота плоскости оптических осей по отношению к геометрической оси кристалла.

Ошибка измерений величины аномального двулучепреломления определяется погрешностью измерений  $D$  ( $\pm 1$  деление окуляр-микрометра) и составляет  $\pm 0.15 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ .

Полученные результаты свидетельствуют, что неоднородность показателя преломления вольфрамата бария зависит от условий выращивания, в частности, температурных градиентов и локальных изменений объёмной скорости кристаллизации. Для кристаллов, полученных в оптимальных условиях,  $\text{grad } n$  не превышает  $(0.4 \pm 0.15) \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ . Также показано, что длительный высокотемпературный отжиг образцов на воздухе позволяет значительно снизить термические напряжения и, следовательно, оптическую неоднородность кристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-32-70015.

1. Атрощенко Л.В., Бурачас С.Ф., Гальчинецкий Л.П. и др. Кристаллы сцинтилляторов и детекторы ионизирующих излучений на их основе. – Киев: Наукова Думка, 1998 г.
2. Басиев Т.Т., Осико В.В.. Успехи химии. 2006, **75**,10, 2–17.
3. Зверев П.Г., Басиев Т.Т., Соболев А.А. и др. Квантовая электроника, 2000, **30**(1), 55–59.
4. L.I. Ivleva, I.S. Voronina, P.A. Lykov, et al. Journal of Crystal Growth. 2007, **304**, 108–113.

**Влияние термообработки  
на структуру и механические свойства  
кристаллов диоксида циркония,  
частично стабилизированных оксидом гадолиния**

**Числов А.С.<sup>1,2</sup>**

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

*2- Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», институт новых материалов и нанотехнологий, Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-71-72

Среди многообразия конструкционных материалов особый интерес вызывает частично стабилизированный диоксид циркония. Высокая твёрдость и трещиностойкость, способность работать в условиях повышенных температур и агрессивных сред позволяют использовать данные материалы в самых разных областях науки и техники.

Однако твёрдые растворы на основе диоксида циркония с кубической и тетрагональной структурой являются термодинамически метастабильными при комнатной температуре, и в условиях эксплуатации при повышенных температурах могут претерпевать структурные превращения, приводящие к существенной деградации их функциональных характеристик.

Целью данной работы стала характеристика влияния термообработки на фазовый состав и механические свойства монокристаллов диоксида циркония, частично стабилизированных оксидом гадолиния.

В данной работе представлены результаты исследования механических свойств, структуры и фазовой устойчивости монокристаллических твёрдых растворов  $ZrO_2-Gd_2O_3$  до и после отжига на воздухе и в вакууме при температуре 1600 °С. В отличие от исследования керамики рассмотрение монокристаллов даёт более полное представление о формировании фазового состава и его влиянии на механические свойства в данных материалах.

Синтез монокристаллов для исследования осуществлялся



методом направленной кристаллизации расплава в холодном контейнере. Определение фазового состава кристаллов проводилось методом рентгеновской дифрактометрии. Микротвёрдость и трещиностойкость кристаллов были измерены методом индентирования.

Исследование фазового состава и механических характеристик кристаллов на основе диоксида циркония в зависимости от концентрации стабилизирующего оксида показало, что увеличение концентрации  $Gd_2O_3$  в кристаллах от 2.8 до 4.0 мол. % приводит к уменьшению содержания трансформируемой тетрагональной фазы и уменьшению степени её тетрагональности. Что в свою очередь приводит к уменьшению трещиностойкости кристаллов с увеличением концентрации  $Gd_2O_3$ .

Показано что отжиг тетрагональных твердых растворов  $ZrO_2-Gd_2O_3$  приводит к увеличению значений трещиностойкости для всех исследуемых составов, за счет снятия микронапряжений в кристаллах. Фазовый анализ показал, что после отжига при температуре 1600 °С на воздухе количество нетрансформируемой тетрагональной фазы увеличилось для всех образцов по сравнению с ростовыми кристаллами и кристаллами, термообработанными на воздухе. При отжиге на воздухе значения трещиностойкости выше, чем при отжиге в вакууме, так как количество нетрансформируемой фазы при отжиге на воздухе не увеличивается.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Ломоновой Е.Е. и к.ф.-м.н. Табачковой Н.Ю. за постановку научной задачи и обсуждение результатов исследования.

# ФИЗИКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМ

## Полигональные фотонные паттерны в гармонической ловушке в брэгговском микрорезонаторе

Седова И.Е., Седов Е.С.

*Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,  
Владимир*

*E-mail: [evgeny\\_sedov@mail.ru](mailto:evgeny_sedov@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-73-75

*Спин-орбитальное взаимодействие* (COB) света — это способность внешней (орбитальной) степени свободы электромагнитной волны оказывать влияние на её внутреннюю (поляризационную) степень свободы [1], причём влияние это является обоюдным. Эффекты, вызванные COB, становятся более выраженными, когда распространение света ограничено в одном из направлений, как это происходит в брэгговском микрорезонаторе, образованном слоем диэлектрика толщиной порядка длины волны света, окружённым парой распределённых брэгговских отражателей [2, 3]. Проблема описания электромагнитного поля в такой структуре сводится к описанию двух расщеплённых по энергии мод ортогональных поляризаций (TE и TM) в двумерной системе.

TE–TM расщепление лежит в основе COB света в брэгговском микрорезонаторе. Для его описания удобно использовать псевдоспиновый формализм, в соответствии с которым вклад расщепления можно рассматривать как действие некоторого эффективного магнитного поля  $\mathbf{\Omega} = [\Delta k^2 \cos 2\theta, \Delta k^2 \sin 2\theta, 0]$ , вызывающего прецессию вектора псевдоспина  $\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$ . Уравнение прецессии имеет простой вид  $d_t \mathbf{S} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{S}$ . Вектор  $\mathbf{S}$  есть не что иное как вектор Стокса, характеризующий поляризацию света. В выражении для  $\mathbf{\Omega}$  параметр  $\Delta$  есть константа расщепления в структуре,  $k$  и  $\theta$  — модуль волнового вектора  $\mathbf{k}$  и полярный угол, определяющий направление в плоскости микрорезонатора.

В настоящей работе предложен подход к формированию полигональных оптических паттернов в брэгговском микрорезонаторе. Подход использует совместный вклад COB и

локализация света в плоскости микрорезонатора при помощи гармонической ловушки. Последняя может быть создана путём модуляции толщины микрорезонатора в направлении радиуса [4]. Индуцированное ТЕ–ТМ расщеплением спин-орбитальное взаимодействие вызывает осцилляции в плоскости микрорезонатора макроскопических волновых пакетов поляризованных фотонов. Последние, будучи заключёнными в гармоническом потенциале, следуют вдоль замкнутых траекторий полигональной формы. Схематично возбуждение полигональных паттернов в гармонической ловушке непрерывной оптической накачкой, резонансной собственным модам микрорезонатора, изображено на рис. 1(а).

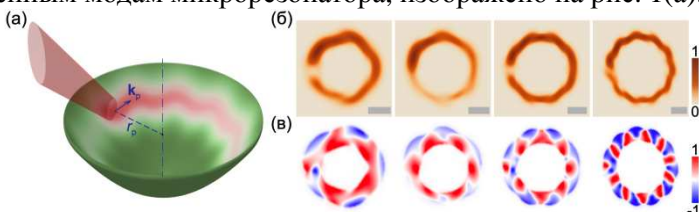


Рис. 1. Схема возбуждения полигональных паттернов в гармонической ловушке непрерывной оптической накачкой (а). Распределение интенсивности (б) и степени циркулярной поляризации (в) излучения в полигональной форме в плоскости микрорезонатора. Размерный отрезок соответствует 25 мкм.

В отсутствие СОВ электрическое поле в рассматриваемой структуре удовлетворяет свойствам квантового гармонического осциллятора, и фотоны, инжектированные в резонатор резонансной накачкой, следуют по замкнутым эллиптическим траекториям. Присутствие СОВ вызывает осцилляции траектории фотонов в направлении, перпендикулярном направлению распространения, с частотой  $|\Omega|$ . В результате эллиптическая форма траектории преобразуется в полигональную. Осцилляции траектории частицы под воздействием внутренней (псевдоспиновой) степени свободы известны как *циттербевергунг*. Эффект, предсказанный Э. Шрёдингером для свободных электронов, позднее был обнаружен в иных физических системах, в том числе в брэгговских микрорезонаторах для квазичастиц экситон-поляритонов, представляющих собой микрорезонаторные фотоны, связанные с экситонами в квантовых ямах, встроенных в структуру [5].

Для изучения особенностей формирования полигональных

фотонных паттернов в микрорезонаторе с гармонической ловушкой выполнена серия численных экспериментов, состоящих в численном решении обобщённого уравнения Паули для спинора  $|\Psi\rangle = [\Psi_+(t, \mathbf{r}), \Psi_-(t, \mathbf{r})]^T$ , где  $\Psi_{\pm}(t, \mathbf{r})$  характеризуют моды ортогональных циркулярных поляризаций. Уравнение учитывает кинетическую энергию фотонов, гармонический потенциал в плоскости микрорезонатора, СОВ, а также потери фотонов и пространственно-локализованную непрерывную резонансную оптическую накачку. Подробнее см. работу [6]. На рис. 1(б) и 1(в) приведено распределение интенсивности ( $I(\mathbf{r}) = |\Psi_+(t, \mathbf{r})|^2 + |\Psi_-(t, \mathbf{r})|^2$ ) и распределение степени циркулярной поляризации ( $s_z(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r})^{-1}[|\Psi_+(t, \mathbf{r})|^2 - |\Psi_-(t, \mathbf{r})|^2]$ ) фотонов в плоскости микрорезонатора соответственно для разных волновых векторов резонансной накачки и разных положений пятна накачки относительно центра гармонической ловушки. Наглядно продемонстрирована возможность возбуждения в структуре полигональных фотонных паттернов с контролируемым (как чётным, так и нечётным) числом узлов. Описанный эффект является ярким проявлением спин-орбитального воздействия света на макроскопическом масштабе.

Авторы выражают благодарность научным руководителям проф. А.В. Кавокину и проф. С.М. Аракелян. Работа подготовлена при поддержке государственного задания ВлГУ в сфере научной деятельности в рамках проекта № 0635-2020-0013, а также гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских учёных № МК-4729.2021.1.2.

1. Bliokh K.Y., Rodríguez-Fortuño F.J., Nori F., Zayats A.V. *Nat. Photon.* 2015, **9**, 796.
2. Kavokin, J. Baumberg, G. Malpuech, F. Laussy. *Microcavities*, second ed., Oxford University, Oxford, 2017.
3. Panzarini G., Andreani L.C., et al. *Phys. Rev. B* 1999, **59**, 5082.
3. Kaitouni R.I., El Daif O., Baas A., et al. *Phys. Rev. B* 2006, **74**, 155311.
4. Седова И.Е., Седов Е.С., Аракелян С.М., Кавокин А.В. *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2020, **84**, 1712–1718.
5. Sedov E., Sedova I., Arakelian S., Kavokin A. *Opt. Lett.* 2021, **46**, 1836–1839.

## Андреевские состояния и ток в многотерминальном джозефсоновском контакте

**Посадский А.Ф.**

*Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет), Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-76-77

Явление бездиссипативного протекания тока через слабую связь между двумя сверхпроводниками в отсутствие напряжения было теоретически предсказано в 1962 г. Б. Джозефсоном [1] и до сих пор является темой множества научных трудов. В последнее время большой интерес вызывают структуры с большим числом ( $N > 2$ ) терминалов на основе нормальных металлов, полупроводников и сверхпроводников. Теоретическое их описание необходимо для понимания таких ключевых свойств систем, как ВАХ, ток-фазовая характеристика и т. п., и впоследствии поможет возможной интеграции их в приборы.

Цель данной работы - изучение свойств многотерминального джозефсоновского контакта в случае, когда длины его терминалов различны. Мы считаем, что границы между нормальными областями и сверхпроводящими прозрачные, а в центре находится точечная примесь, описываемая некоторой матрицей рассеяния  $S$ . С использованием уравнений Боголюбова-Де Жена [2] получены уравнения на коэффициенты при возбуждениях при произвольном числе контактов, проанализирована постановка задачи рассеяния в такой структуре, рассмотрено уравнение на спектр, получена формула для вклада в ток электронов от состояний непрерывного спектра.

Для большей осязаемости результатов проанализирован частный случай трёх терминалов. С помощью численного моделирования получены спектры такой структуры при различных длинах «колен» (Рис. 1). Видно, что реализуются как бесщелевой спектр, так и спектр со щелью. Помимо этого, найдено явное выражение для вклада в ток непрерывного спектра.

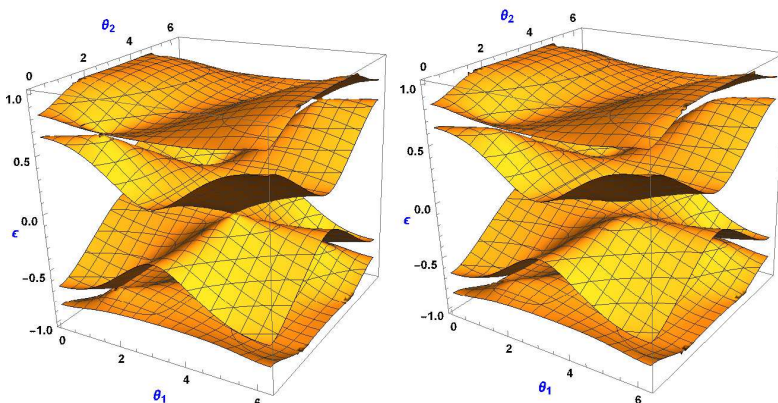


Рис. 1. Графики зависимости энергии от разностей фаз сверхпроводников для чистой (слева) и максимально симметричной (справа) матриц.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Семёнову Андрею Георгиевичу за помощь в координации работы, дельные советы и обсуждения данной задачи, а также всем, кто сколь-нибудь помогал в процессе написания.

1. B.D. Josephson. Phys. Lett. 1962, **1**, 251–253.
2. П. Де Жен. Сверхпроводимость металлов и сплавов, Москва, Мир, 1968.
3. Li-Fu Chang and P.F. Bagwell. Phys. Rev. B. 1994, **49**, 15853–15863.
4. P. F. Bagwell. Phys. Rev. B. 1992, **46**, 12573–12586.
5. Hong-Yi Xie, M.G. Vavilov and A. Levchenko. Phys. Rev. B. 2017, **96**, 161406-1-161406-5.

---

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## Квазианалитическая модель динамики ионных пучков в нейтральном газе и электрических полях

**Аблизен Р.С.**

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

*E-mail: [rombo91@mail.ru](mailto:rombo91@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-78-78

Разработан квазианалитический подход для решения системы уравнений переноса, описывающей динамику пучков заряженных частиц в потоке нейтрального газа и под действием электрических полей. Получено точное решение для случая, когда ионы движутся с постоянными скоростями и имеют произвольные начальные распределения. Используя численный подход, данный результат обобщается на случай переменных скоростей ионных пучков. Наконец, используя метод характеристик, рассматривается самосогласованная задача для системы уравнений переноса, в которую, помимо эффекта рекомбинации, входит кулоновское взаимодействие между ионами. Исходная система уравнений с частными производными сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений вдоль характеристик, получены точные решения для некоторых частных случаев.

## Частотная зависимость формы завершённого скользящего разряда

**Грудиев Е.И.**

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

*E-mail: [gnaurus08@yandex.ru](mailto:gnaurus08@yandex.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-79-81

В настоящее время ведутся работы по использованию электрических разрядов для инициации и стабилизации горения в высокоскоростных потоках топливных смесей [1, 2]. По сравнению с другими типами разрядов скользящий по поверхности твёрдого диэлектрика разряд обеспечивает однородное засвечивание при относительно низких напряжениях, а также удобное расположение электродной системы в потоке газа.

В зависимости от амплитуды питающего напряжения  $U$ , крутизны фронта напряжения, давления рабочего газа  $p$  и межэлектродного расстояния  $L$  можно выделить две стадии разряда: 1) незавершённую — слаботочный разряд, не замыкающий разрядный промежуток, поддерживаемый токами смещения заряда конденсатора, образованного металлической подложкой и слоем образующейся плазмы; 2) завершённую — разряд, замыкающий межэлектродный промежуток.

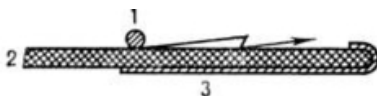


Рис. 1. Схема расположения электродов: 1 — иницирующий электрод, 2 — диэлектрический слой, 3 — заземлённый электрод.

Скорость распространения незавершённого скользящего разряда зависит от отношения  $U/p$  и по порядку величины сопоставима со скоростью высокоскоростного потока газовой смеси [3] — это даёт возможности для управления физико-химическими параметрами потока.

В этой работе экспериментально исследован завершённый скользящий разряд в частотном режиме.



Эксперименты проводились в вакуумной камере при давлениях от 10 до 60 торр. В качестве рабочего газа использовался воздух. Скользящий разряд распространялся по поверхности стеклотекстолита толщиной 1 мм (длина разрядного промежутка — 9 см). На иницирующий электрод подавались импульсы отрицательной полярности. Подаваемое напряжение изменялось в пределах от 3 до 5 кВ. Частота повторения импульсов — от 50 Гц до 1 кГц. Крутизна фронта напряжения  $\sim 10^{10}$  В/с. Для измерения электрических параметров разряда использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS220. Напряжение измерялось с помощью резистивного делителя 1:1100, ток регистрировался с помощью пояса Роговского. Фотосъемка разряда производилась цифровой фотокамерой Canon EOS 500D.

При увеличении частоты следования импульсов обнаружен переход завершённой стадии скользящего разряда в дугу в центральной области поверхности диэлектрика. Дуга поднимается циклически: с поверхности диэлектрика до некоторой высоты, а затем срывается. При дальнейшем увеличении частоты в дугу переходит весь поверхностный разряд, претерпевая аналогичный циклический подъём. В итоге, на некоторой частоте дуга прекращает циклический подъём и находится в состоянии равновесия (Рис. 2).

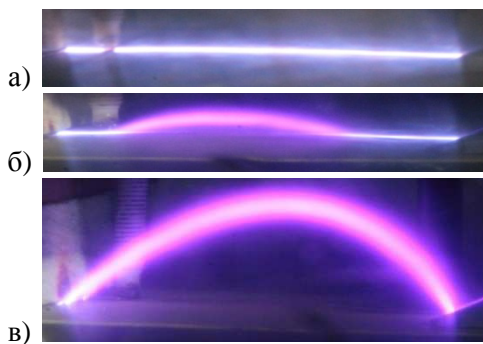


Рис. 2. Эволюция формы скользящего разряда при изменении частоты следования импульсов питания: а) — 250 Гц, б) — 300 Гц, в) — 350 Гц. Давление 25 торр. Экспозиция 1/400 с.

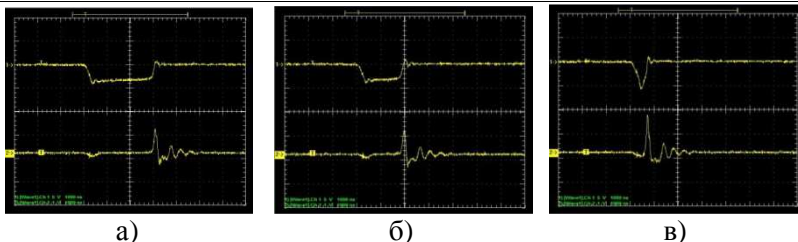


Рис. 3. Осциллограммы напряжения (верхняя, 5 В/дел) и тока в зависимости от частоты следования импульсов питания при давлении 25 Торр. а) — 250 Гц, б) — 300 Гц, в) — 500 Гц.

Кроме изменения формы разряда претерпевает изменение и время закорачивания разрядного промежутка (Рис. 3). Это происходит за счёт сокращения промежутка скользящей фазы разряда, скорость распространения которой зависит от электротехнических параметров разрядного промежутка и отношения  $U/p$  [3, 4, 5].

Таким образом, показано, что при фиксированных параметрах электродной системы с увеличением частоты следования импульсов питания выше 300 Гц завершённый скользящий разряд переходит в дуговой. Данный режим разряда может применяться в области горения воздушно-топливных смесей аналогично тому, как это рассматривалось в работе [1].

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Кузьмину Г.П., д.т.н. Минаеву И.М. и н.с. Тихоневичу О.В. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Ershov A.P., Kamenshchikov S.A., Logunov A.A. et al. High Temp. 2009, **47**, 613–619.
2. Barkhudarov E.M., Berezhetskaya N.K., Kop'ev V.A. et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 2010, **43**, 365203 (9pp).
3. Grudiev E.I., Kuzmin G.P., Minaev I.M. et al. Bull. Lebedev Phys. Inst. 2021, **48**, 165–169.
4. Bashkin V.K., Kuzmin G.P., Minaev I.M. et al. Prikl. Fiz. 2005, **6**, 54–59.
5. Kuzmin G.P., Minaev I.M., Rukhadze A.A. et al. Bull. Lebedev Phys. Inst. 2010, **37**, 216.

## Исследование синтеза катализаторов платиновой группы в мощном микроволновом разряде гиротрона

**Заклецкий З.А.<sup>1</sup>, Борзосекоев В.Д.<sup>1</sup>, Степахин В.Д.<sup>1</sup>,  
Малахов Д.В.<sup>1</sup>, Соколов А.С.<sup>1</sup>, Мошкина К.Г.<sup>1,2</sup>, Козак Н.К.<sup>1</sup>**

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

*2- Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский  
университет), Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-82-82

Разработка современных методов синтеза катализаторов платиновой группы является важной научной задачей в области энергетики, автомобилестроения и химической промышленности. В ИОФ РАН в последние годы был разработан уникальный комплекс по плазмохимическому синтезу катализаторов на основе взаимодействия мощного микроволнового миллисекундного импульса гиротрона со смесью порошков металл-диэлектрик [1].

В докладе будут представлены последние результаты по плазмохимическому синтезу платиновых катализаторов на оксидных (рис. 1) и оксонитридных носителях при различных массовых соотношениях порошков.

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

1. Skvortsova N.N. *Ceramics International*. 2021, **47**(3), 3978.

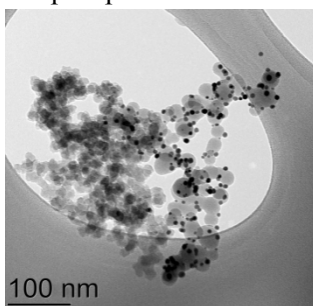


Рис. 1. Полученная с помощью просвечивающего электронного микроскопа фотография синтезированного платинового катализатора.

## Особенности анализа микрофотографий образцов, полученных в результате инициации СВЧ разрядов в смесях порошков

**Качмар В.В.**

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

*E-mail: [yv.kachmar@fpl.gpi.ru](mailto:yv.kachmar@fpl.gpi.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-83-85

В настоящей работе представлена методика компьютерного анализа микрофотографий образцов, которые получают в результате микроволновых экспериментов с порошковыми смесями. Помещённые в плазмохимический реактор смеси порошков облучаются гиротронными импульсами мощностью до 450 кВт и длительностью до 10 мс, что приводит к инициации разрядов внутри и на поверхности смесей и развитию цепных химических реакций в объёме реактора. На данном методе основаны эксперименты, целью которых является 1) проведение имитационных испытаний металлов для лунных миссий [1]; 2) синтез катализаторов на оксидных носителях [2]. Переход от одного вида экспериментов к другому происходит посредством изменения порошковой смеси и установки металлических пластин: в случае имитационных испытаний смесь представляет собой лабораторный аналог лунного реголита, над которым устанавливаются металлические образцы; в случае синтеза катализаторов — это, например, смесь платины с оксидом, при этом металлические пластины из реактора изымаются.

В результате имитационных экспериментов на тестируемые металлы осаждаются частицы реголита, что приводит к модификации металлической поверхности. В свою очередь, результатом экспериментов по синтезу катализаторов является сама порошковая смесь: под влиянием СВЧ-энергии частицы платины осаждаются на оксиды, создается каталитическая система. В каждом эксперименте строятся распределения частиц по размерам: в имитационных испытаниях это осажённые на металлические пластины частицы реголита, в синтезе катализаторов — осажённые на оксиды частицы платины.

Необходимость построения распределений в обоих экспериментах заключается в следующем. В случае экспериментов с реголитом важно повторить распределение реальных лунных образцов, которое является одним из фундаментальных характеристик лунного грунта. В экспериментах по синтезу катализаторов по распределениям можно судить об активности и селективности катализаторов. Это означает, что размеры частиц платины должны быть не более 10 нм и описываться узким гауссовым распределением.

Для решения задачи о построении распределений используются методы электронной микроскопии и компьютерные методы обработки микрофотографий. Для наблюдения проводящих металлических пластин с частицами реголита использовался сканирующий электронный микроскоп (SEM — *Scanning Electron Microscopy*). Основную часть каталитической системы составляют диэлектрики, при SEM-методе заряд на диэлектриках накапливается, эта проблема устраняется при использовании *просвечивающего электронного микроскопа* (TEM — *Transmission Electron Microscopy*). Разные методы микроскопии привели к двум различным алгоритмам анализа микрофотографий.

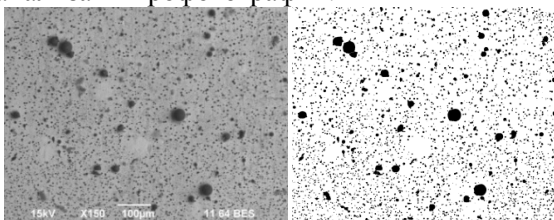


Рис. 1. SEM-микрофотография частиц реголита на тантале (слева) и идентифицированные на ней частицы реголита (справа).

Показано, что вследствие контрастности SEM-изображений подходит наиболее простой метод сегментации изображений — *глобальная бинаризация (thresholding)*: частицы реголита имеют отличную от фона (металлической поверхности) интенсивность, этот контраст сохраняется по всему изображению и поэтому для сегментации изображения достаточно выбрать два цвета — один для фона, второй для частиц (рис. 1). Однако для усиления контрастности изображения необходимо прибегнуть к

предварительной его обработке фильтрами (например, методы Фурье-фильтрации).

Особенностью ТЕМ-изображений является низкий контраст между анализируемыми частицами платины и оксидов, который, кроме того, зависит от конкретной области микрофотографии (рис. 2). Для сегментации таких изображений необходимы методы, учитывающие локальные особенности микрофотографий — *локальная бинаризация (local thresholding)* и разбиение *графов (graph cut)*. Для них интенсивности фона и частиц являются зависящими от конкретной области изображения параметрами.

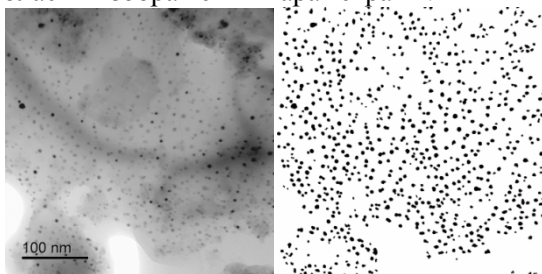


Рис. 2. ТЕМ-микрофотография частиц платины на оксиде алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (слева) и идентифицированные на ней частицы платины.

После получения бинарных изображений идентифицированные частицы аппроксимируются эллипсами, и выводится таблица с площадями частиц. Это даёт возможность рассчитать их линейные размеры, за которые принимаются диаметры эквивалентных по площади окружностей, и построить распределения частиц по размерам.

Разработанная методика призвана помочь в автоматизации анализа микрофотографий. В рамках описанных экспериментов проблема автоматизации актуальна и продиктована большим количеством изображений образцов, для которых необходимо получать распределения.

Автор выражает благодарность научному коллективу проекта ГЗ БВ10 2021.

1. Skvortsova N.N., Maiorov S.A., Malakhov D.V. et al. JETP Letters. 2019, **109(7)**, 452–459.
2. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S. et al. Ceram Int. 2021, **47**, 3978–3987.

## **Модификация поверхности пластин тантала в разряде, инициируемом микроволновым излучением гиротрона в порошке реголита**

**Мошкина К.Г.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-86-88

Плазменно-пылевые облака, левитирующие над поверхностью Луны, состоят из заряженных микрочастиц и поднимаются на высоту десятков километров. Основным источником взвешенной заряженной пыли на Луне является покрывающий её поверхность реголит (лунная пыль), толщина слоя которого в районах лунных морей колеблется от нескольких сантиметров до нескольких метров.

Заряженные частицы на Луне обладают высокой адгезионной способностью, из-за чего лунная пыль способна прилипнуть к скафандрам астронавтов, поверхностям космических аппаратов, приборам и устройствам. Это может привести к износу деталей посредством стирания механизмов и загрязнению поверхностей солнечных батарей. Именно поэтому при проектировании космической техники, предназначенной для посадки на Луну, важно понимать воздействие реголита на конструкционные материалы.

Образование плазменно-пылевых ансамблей заряженных микрочастиц на поверхности смеси порошков (соответствующих лунному реголиту), было обнаружено в разрядах, инициируемых мощным гиротронным излучением [1]. В эксперименте смесь порошков, помещённая на кварцевую пластину в плазмохимическом реакторе с открытой верхней границей, подвергалась воздействию импульсного микроволнового излучения. Когда энергия гиротрона превышала некоторые пороговые значения, частицы порошка испускались с поверхности из-за кулоновских сил отталкивания между отдельными заряженными частицами [2]. После этого на поверхности порошка развивались экзотермические цепные реакции, приводящие к синтезу нано- и микрочастиц [3, 4].

Заряженные частицы образуют над поверхностью порошка левитирующее облако, которое по химическому составу и размеру соответствует лунному реголиту. Физико-химические процессы в



реакторе и левитация частиц подобны процессам образования облаков лунной пыли при бомбардировке поверхности Луны микрометеорами [5].

Половина изучаемых нами образцов тантала была предварительно обработана струей низкотемпературной плазмы *диэлектрического барьерного разряда* (ДБР) [6]. Обработка была применена для получения исходных образцов с модифицированной поверхностью, которую далее можно было использовать для сравнительного анализа после воздействия гиротронного разряда.

На рис. 1 слева показана поверхность образца после обработки ДБР (масштаб 100 мкм), справа — приведена фотография (электронная микроскопия) частиц реголита, осажденных на поверхности тантала (масштаб 20 мкм).

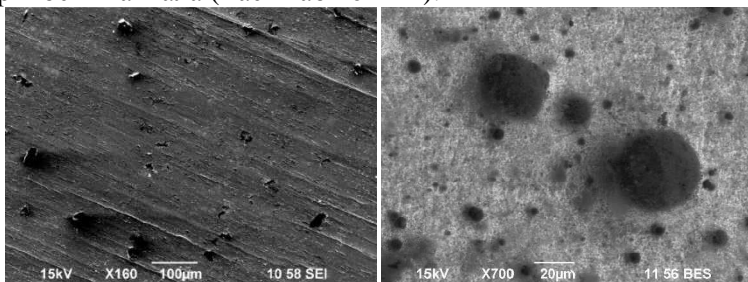


Рис. 1. Снимки поверхности пластин тантала: после обработки ДБР (слева), с осажденными частицами реголита (справа).

По снимкам электронной микроскопии были получены и проанализированы распределения частиц по размерам для каждого образца. Из них следует, что на необработанном образце оседает больше крупных частиц, которые принимают более правильную форму. Изначально имея аморфную с острыми углами форму, они преобразуются в сферические частицы. Химический состав напыления на образцах не отличается от реголита с Луны.

1. Skvortsova N.N., Malakhov D.V., Stepakhin V.D., et al. JETP Lett. 2017, **106**, 262.
2. Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Borzosekov V.D., et al. J. Nanoelectron. Optoelectron. 2013, **8**, 58.
3. Helfferich F.G. Kinetics of multistep reactions. Elsevier, 2004.
4. Skvortsova N.N., Akhmadullina N.S., Batanov G.M., et al. EPJ Web of Conf. 2017, **149**, 02016.



5. Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А. и др. Письма в ЖЭТФ. 2016, **103**, 641.
6. Artem'ev K.V. Bogachev N.N., Gusein-zade N.G., et al. Russian Physics Journal. 2020, **62**, 2073–2080.

**Вейвлет-анализ  
низкочастотных флуктуаций плотности плазмы  
при многоимпульсном ЭЦР нагреве в стеллараторе Л-2М**

**Нестеренко П.А.<sup>1</sup>, Смирнов В.А.<sup>2</sup>, Борзосеков В.Д.<sup>1</sup>**

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

*2 – Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва*

*E-mail: [polynester2000@gmail.com](mailto:polynester2000@gmail.com)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-89-91

Возможность использования возобновляемых природных ресурсов для получения экологически чистой энергии давно являлась стремлением многих учёных и бизнесменов. Изучение процессов, протекающих в плазме, является ключевым элементом для создания и распространения установок для управляемого термоядерного синтеза во всем мире. Актуальность данной работы обусловлена особенностями неброуновского движения частиц в плазме, связанными с развитием в такой среде сильной структурной турбулентности. Процесс изучения физики высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза в тороидальных установках требует одновременного использования различных радиофизических бесконтактных диагностик.

Целью исследования является анализ широкополосных зашумлённых плазменных сигналов, измеренных диагностиками малоуглового и обратного рассеяния излучения гиротрона при многоимпульсном ЭЦР нагреве в стеллараторе Л-2М.

Схема установки рассматриваемых диагностик коллективного рассеяния в полоидальном сечении ЭЦ-нагрева на стеллараторе Л-2М представлена на рисунке 1. В рамках данного исследования к анализу представлены сигналы с диагностик *малоуглового рассеяния* (МУР) обыкновенной волны на длинноволновых флуктуациях плотности плазмы ( $\lambda \sim 4$  см) и *обратного рассеяния* (ОР) необыкновенной волны на коротковолновых флуктуациях плотности плазмы ( $\lambda \sim 2$  мм) [1]. Для оценки параметров флуктуаций был разработан программный комплекс в среде Matlab [2].

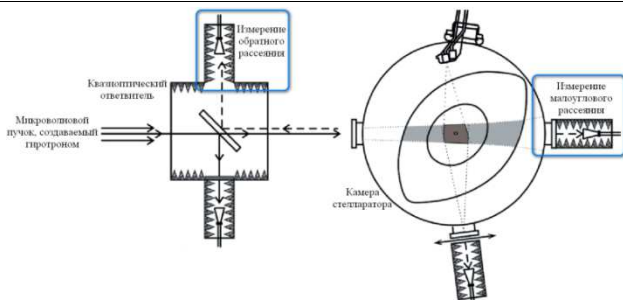


Рис. 1. Схема рассматриваемых диагностик стелларатора Л-2М.

Корреляционный и спектральный Фурье-анализ не позволяют проанализировать временные характеристики плазменных сигналов, усредняя данные по длительности временного окна. Для подробного анализа сигналов, а также для оценки стационарности спектральных характеристик сигналов обоих диагностик одновременно применяются методы вейвлет-анализа. В данном исследовании используется базовый вейвлет — Морлет (рис. 2) [3].

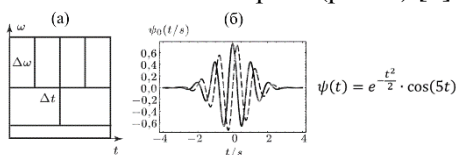


Рис. 2. (а) — частотно-временная локализация значений вейвлет-преобразования, (б) — базисная вейвлет-функция Морлет

В качестве анализируемого сигнала из базы Л-2М выбран стационарный участок (50.25–50.50 нс) плазменного разряда №21374 (рис. 3).

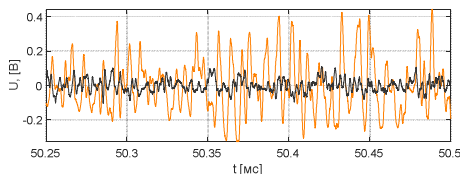


Рис. 3. Сигналы МУР (оранжевый) и ОР (серый) на стационарном участке

Вейвлет-анализ с использованием базисного вейвлета Морлет показал, что вихревые структуры миллиметрового (ОР) и сантиметрового (МУР) масштабов в сильной плазменной турбулентности коррелируют во времени. Коэффициент вейвлет-

когерентности для протяженных во времени вейвлетов достигает 90 %, что указывает на измерение двумя диагностиками одних и тех же случайно возникающих во времени вихрей. В сильной турбулентности ( $\Delta f/f_{\text{осн}} \gg 1$ ) на краю плазмы в стеллараторе Л-2М ранее были описаны протяженные полоидальные вихревые структуры, которые хорошо описывались вейвлетом Морлет [4].

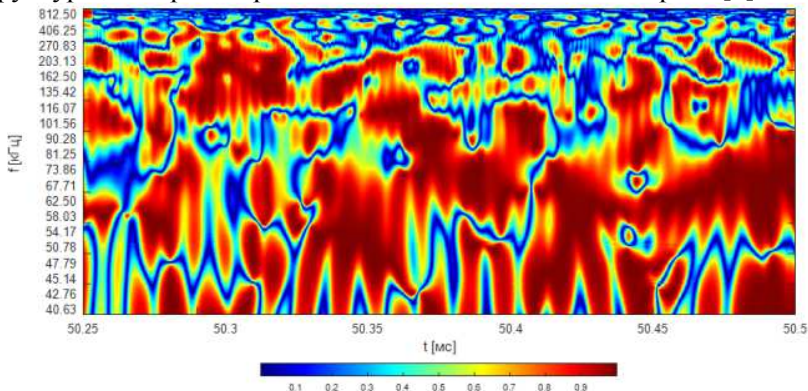


Рис. 4. Вейвлет-когерентность сигналов МУР и ОР.

Таким образом, за счёт хорошей локализации значений вейвлет-преобразования в частотно-временном пространстве, вейвлет-анализ является мощным аппаратом при анализе сигналов плазменной турбулентности, описывая структуру локальных процессов.

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

1. Акулина Д.К., Батанов Г.М., Бережецкий М.С. и др. Письма в ЖЭТФ. 1999, **69**(6), 407–412.
2. Борзосеков В.Д., Смирнов В.А. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021617541, 17.05.2021.
3. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003, 18–41.
4. Kharchev N.K., Skvortsova N.N., Sarksyant K.A., Journal of Mathematical Sciences. 2001, **106**, 2691–2703.

## **Анализ наработки долгоживущих активных форм кислорода и азота в водных растворах под действием прямого пьезоразряда**

**Павлик Т.И., Кончечков Е.М.**

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

*E-mail: [ti.pavlik.u@gmail.com](mailto:ti.pavlik.u@gmail.com)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-92-93

В настоящий момент всё больший общественный интерес вызывают плазменные технологии, основанные на использовании низкотемпературной плазмы, генерируемой в атмосферной среде. Водные растворы, обработанные низкотемпературной плазмой, используются в медицине, сельском хозяйстве и пищевой промышленности [1]. На границе водной и воздушной среды из молекул воды, азота и кислорода образуются активные короткоживущие соединения кислорода, водорода и азота. Между ними продолжается взаимодействие в растворе, в результате чего образуются наиболее долгоживущие соединения: нитриты, нитраты и пероксид водорода [2]. Количество и виды этих соединений зависит от физических характеристик низкотемпературной плазмы и воздушной среды и от состава раствора.

Целью исследования является изучение наработки активных форм кислорода и азота в водных растворах под действием прямого пьезоразряда.

Актуальность данного исследования состоит в подготовке данного источника холодной плазмы для использования в медицине и сельском хозяйстве. Необходимо изучить, какие активные вещества и в каком количестве нарабатываются в водных растворах под действием холодной плазмы.

В данной работе использовался компактный источник низкотемпературной плазмы (прямого пьезоразряда), разработанный в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН [3]. Обработка дистиллированной воды (Milli-Q) и физиологического раствора (0.9 %

NaCl) проводилась в течение разного времени и с разной выходной мощностью. Выходная мощность источника низкотемпературной плазмы регулировалась с помощью коэффициента заполнения генератора широтно-импульсной модуляции (17 % и 20 %).

В течение 30 мин после обработки растворов низкотемпературной плазмой в них измерялась концентрация нитрит-ионов фотометрическим методом, нитрат-ионов электродным методом и пероксида водорода хемилюминесцентным методом.

Наработка активных форм кислорода и азота в дистиллированной воде меньше, чем в физиологическом растворе. Это может быть связано с тем, что физиологический раствор обладает большими буферными свойствами — исследования показали, что при воздействии низкотемпературной плазмы кислотность физиологического раствора растёт гораздо медленнее, чем кислотность дистиллированной воды. При этом наработка всех исследуемых соединений зависит от мощности источника. С увеличением времени и мощности обработки концентрация пероксида водорода и нитритов сначала возрастала, а потом выходила на плато и падала, что, скорее всего, связано с дальнейшим окислением этих соединений. Концентрация нитратов с увеличением времени и мощности обработки только возрастала, что подтверждает предположение об окислении образующихся нитритов до нитратов.

По полученным данным о влиянии различных режимов обработки низкотемпературной плазмой на химический состав водных растворов можно подобрать необходимый режим, исходя из дальнейших целей использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-02-00378.

1. Kaushik N.K., Ghimire B., Li Y. et al. Biol Chem. 2018, **400**, 39–62.
2. Liu D.X., Liu Z.C., Chen C. et al. Scientific Reports. 2016, **6**, 23737.
3. Колик Л.В., Харчев Н.К., Борзосеков В.Д. и др. 2018, Патент №181459.

**Синтез оксидных, нитридных и оксинитридных  
материалов микро- и наноразмеров  
на основе порошков Al/AlN, Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
в разрядах, инициированных излучением  
мощного гиротрона**

**Борзосеков В.Д., Соколов А.С., Степахин В.Д.**

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

*E-mail: [dmc63@yandex.ru](mailto:dmc63@yandex.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-94-96

Задачи современного материаловедения, связанные с синтезом частиц микро- и наноразмеров, могут быть решены с помощью плазменных микроволновых методов с применением мощных импульсных гиротронов. Например, создание оксидных, нитридных и оксинитридных материалов в микродисперсном состоянии с заданным составом и фрактальной поверхностью, являющихся высококачественными носителями для гетерогенных катализаторов платиновой группы.

Экспериментальные исследования проводились на модифицированном плазмохимическом стенде с использованием микроволнового излучения мощного импульсного гиротрона [1]. Описание плазмохимического реактора приведено в [2]. Микроволновый разряд создавался при атмосферном давлении в воздухе и азоте.

Для исследований использовались стандартные коммерческие порошки диэлектриков и металлов без калибровки по размерам. Вследствие этого необходимо проводить предварительный анализ распределения исходных порошков. На рисунке 1 представлены распределения исходных частиц порошков диэлектриков, которые показали максимальный разброс по размерам частиц порошка. Вариации размеров частиц:

- от сотен нанометров (10 %) до нескольких микрон (Al/AlN, среднее значение 3.6 мкм),
- от 1 (10 %) до десятков микрон (Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, среднее 37 мкм).

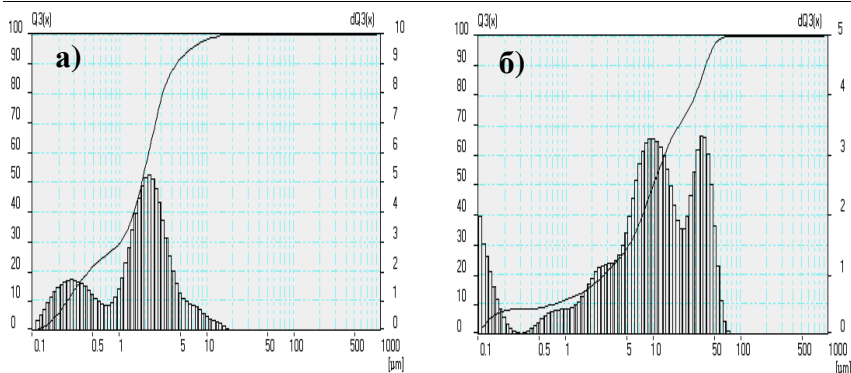


Рис. 1. Распределение по размерам частиц исходных порошков диэлектриков. а) порошок AlN; б) порошок  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Предварительная подготовка смеси порошков металла и диэлектриков осуществлялась при помощи перетирания веществ в ацетоне.

Всего было проведено три эксперимента с разными порошками диэлектрика.

Первый эксперимент связан с получением микроволнового пробоя и цепных процессов синтеза оксидов, нитридов и оксинитридов — по возможности с контролируемым составом — в смесях порошков Al и AlN. Al + AlN в воздухе при соотношении по молям 1:4, 1:2, 1:1.

Следующий эксперимент проведен в смесях порошков Al +  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в воздухе (1:5, 2:4, 3:3, 4:2). Микроволновый пробой и инициация цепных плазмохимических реакций произошли при максимальном содержании металла в порошке при мощности гиротрона 200 кВт и длительности импульса 4 мс (энергия СВЧ 0.8 кДж).

Третий — в смесях порошков Al +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в азоте (1:4, 1:2, 1:1). Микроволновый пробой и инициация цепных плазмохимических реакций произошли при максимальном содержании металла в порошке при мощности гиротрона 350 кВт и длительности импульса 6 мс (энергия СВЧ 2.1 кДж).

Для всех смесей порошков были получены пороговые условия для инициации цепных реакций синтеза (Таблица 1).



Таблица 1

## Пороговые условия для инициации цепных реакций синтеза

Смеси порошков (мольное соотношение)	Газовая среда	Мощность гиротрона, кВт	Длина СВЧ импульса, мс	Пороговая энергия, кДж
Al/AlN (1:1)	воздух	350	4	1.4
Al/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (4:2)	воздух	200	4	0.8
Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1:1)	азот	350	6	2.1

В процессе выполнения научно-исследовательской работы развит метод получения оксидных, нитридных и оксинитридных материалов в микродисперсном состоянии с заданным составом и фрактальной поверхностью. Синтезированные частицы могут быть носителями для катализаторов на основе платиновых металлов. В процессе первого этапа исследований проведены первые эксперименты с платиной.

Изготовленные образцы оксидных, нитридных и оксинитридных материалов микро- и наноразмеров пригодны в качестве носителей для катализаторов на основе платиновых металлов.

Авторы выражают благодарность научному коллективу проекта ГЗ БВ10 2021, в особенности Гусейн-заде Н.Г, Скворцовой Н.Н. и Шишилову О.Н.

1. Kharchev N.K., Batanov G.M., Berezhetskii M.S., et al. Plasma and Fusion Research. 2011, **6**,2402142.
2. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S., et al. Ceramics International. 2020,**47**,3978.

## ФИЗИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

**Высококочувствительная иммуноаналитическая платформа  
на основе функционализованных магнитных наночастиц  
для количественной детекции внеклеточных везикул**

**Брагина В.А.<sup>1</sup>, Гутенева Н.В.<sup>1</sup>, Новичихин Д.О.<sup>1</sup>,  
Веремьева М.В.<sup>1</sup>, Черкасов В.Р.<sup>1,2</sup>, Буренин А.Г.<sup>1</sup>**

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

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

*E-mail: [bragina\\_vera@nsc.gpi.ru](mailto:bragina_vera@nsc.gpi.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-97-99

В медицинской практике большое внимание уделяется инновационному подходу «жидкой биопсии», предназначенному для более быстрой и менее инвазивной диагностики онкологических заболеваний и контроля эффективности их лечения. Внеклеточные везикулы, секретируемые различными клетками в биологические жидкости организма (кровь, слюна, моча и др.) могут использоваться в качестве источника диагностических биомаркеров рака для жидкой биопсии. Тем не менее, применение диагностического потенциала внеклеточных везикул в рутинной клинической практике ограничивается сложностью, трудоёмкостью, высокой стоимостью, или недостаточной чувствительностью доступных методов их регистрации.

Целью нашего исследования явилась разработка высококочувствительной, простой и удобной в использовании иммуноаналитической платформы на основе функционализованных *магнитных наночастиц* (МНЧ) для количественной детекции внеклеточных везикул, выделенных из различных биологических жидкостей (кондиционированных культуральных сред и сыворотки крови человека).

Внеклеточные везикулы были выделены из супернатанта культур клеток рака молочной железы, а также сыворотки крови пациентов с раком молочной железы и здоровых доноров, и

охарактеризованы с помощью современных методов: анализа траекторий наночастиц, просвечивающей электронной микроскопии, проточной цитометрии.

Разработанная иммуноаналитическая платформа основана на сэндвич-формате иммунохроматографического анализа с использованием функционализированных МНЧ в качестве нанометок в сочетании с уникальным по чувствительности методом их регистрации. Методика функционализации магнитных наночастиц антителами против широкого спектра поверхностных белковых маркеров внеклеточных везикул подробно описана в работе [1].

Регистрация иммунокомплексов «функционализированные МЧ — внеклеточные везикулы», задержавшихся на тестовой линии иммунохроматографической тест-полоски осуществлялась с помощью высокочувствительного метода количественного определения МНЧ, основанного на нелинейном намагничивании МЧ переменным магнитным полем на двух частотах и регистрации отклика на комбинаторных частотах [2]. Магнитные ридеры нового поколения, использованные в данном исследовании, позволяют детектировать 0.4 нг МНЧ в объёме 0.2 мл и демонстрируют рекордный линейный динамический диапазон 7 порядков [3]. Такие регистраторы были успешно протестированы для одно- и многопараметрических анализов для высокочувствительной детекции различных аналитов в сложных средах [4, 5] и характеристики взаимодействий «биоконъюгат МНЧ — мишень» [6].

Продемонстрирована возможность использования разработанной платформы для количественного определения внеклеточных везикул с использованием поверхностных мембранных белков CD9, CD81, CD63 и EpCAM в качестве мишеней. Платформа обеспечивает чувствительность на уровне  $1.3 \times 10^7$  везикул на тест и широкий динамический диапазон более 2 порядков. Достигнутый предел детекции на 1–2 порядка лучше, чем у наиболее чувствительных иммунохроматографических анализов и коммерческих иммуноферментных тест-систем для детекции везикул. Такая высокая чувствительность достигается за счёт комбинации сэндвич-формата иммунохроматографического анализа с ультрачувствительной регистрацией иммунных комплексов «функционализированные МНЧ — внеклеточные везикулы» по всему объёму тест-полоски. Специфичность образования иммунных

комплексов была продемонстрирована с помощью визуализирующей проточной цитометрии.

Кроме того, платформа была протестирована для количественной детекции везикул, выделенных из клинических образцов сыворотки крови пациентов с раком молочной железы и здоровых доноров.

Разработанная простая и удобная в использовании иммуноаналитическая платформа для высокочувствительной количественной детекции везикул перспективна для ранней диагностики онкологических заболеваний и рутинного определения клинически-значимых опухоль-ассоциированных биомаркеров для жидкой биопсии.

Авторы выражают благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Никитину П.И., а также к.б.н. Хомяковой Е.Б. и к.б.н. Назаренко И. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Bragina V.A., Orlov A.V., Znoyko S.L., et al. *Anal. Methods*. 2021, **13**, 2424–2433.
2. Nikitin M.P., Orlov A.V., Sokolov I.L., et al. *Nanoscale*. 2018, **10**, 11642–11650.
3. Nikitin M.P., Orlov A.V., Znoyko S.L., et al. *J. Magn. Magn. Mat.* 2018, **459**, 260–264.
4. Bragina V.A., Znoyko S.L., Orlov A.V., et al. *Anal. Chem.* 2019, **91**, 9852–9857.
5. Guteneva N.V., Znoyko S.L., Orlov A.V., et al. *Microchim. Acta*. 2019, **186**, 621.
6. Pushkarev A.V., Orlov A.V., Znoyko S.L., et al. *Sensors*. 2021, **21**, 2802.

## **Исследование цитотоксичности наночастиц оксидов металлов (ZnO, Ag<sub>2</sub>O), синтезированных методом лазерной абляции**

**Бурмистров Д.Е.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-100-102

На сегодняшний день антибиотики являются золотым стандартом в лечении многих бактериальных инфекций. Однако известен целый ряд механизмов формирования устойчивости у бактериальных клеток. Появление антибиотико-резистентных штаммов значительно увеличило количество случаев и тяжесть инфекций, а также увеличило расходы на здравоохранение по всему миру. На сегодняшний день выявлены резистентные практически ко всем доступным антибиотикам штаммы. Всё вышесказанное делает поиск новых антимикробных препаратов первоочередной задачей мирового здравоохранения.

В настоящее время значительно возрастает интерес к наночастицам металлов и оксидов металлов, как соединениям с антибактериальным потенциалом, к которым относятся Ag, Au, ZnO, TiO<sub>2</sub>, CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag<sub>2</sub>O, и др. Однако, актуальной проблемой остаётся токсичность большинства наночастиц металлов и их оксидов для нормальных клеток человека.

Таким образом, целью данного исследования являлась оценка цитотоксичности наночастиц оксида цинка и оксида серебра (I) при остром, т.е. однократном воздействии наночастиц на культуры клеток.

В ходе исследования использовались постоянные клеточные линии HaCaT (кератиноциты человека) и VJ-5ta (фибробласты крайней плоти человека). В качестве питательной среды использовалась RPMI-1640, содержащая 10 % фетальной бычьей сыворотки. Водные растворы наночастиц добавляли в культуральную среду до конечной концентрации 0.01 %, 0.001 %, 0.0001 % через 24 часа после начала культивирования *in vitro*. Оценку

жизнеспособности клеток в культурах проводили с использованием флуоресцентных красителей бисбензимида (окрашивание всех клеток) и пропидий-йодида (окрашивание только нежизнеспособных клеток) через 24 часа после добавления наночастиц. В ходе обработки полученных результатов были рассмотрены следующие параметры: процент жизнеспособных клеток, средняя площадь поверхности, занимаемой клетками, митотический индекс, а также среднее количество клеток на единицу площади. Результаты представлены ниже в виде таблицы.

Таблица

Основные параметры роста и развития клеточных линий NaCaT и BJ-5ta при добавлении наночастиц Ag<sub>2</sub>O и ZnO соответственно с концентрациями 10<sup>-4</sup>–10<sup>-2</sup> % через 24 часа после воздействия

Параметр	Концентрация наночастиц (НЧ), %			
	0	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>
Клеточная линия/ Тип НЧ	NaCaT/Ag <sub>2</sub> O			
Жизнеспособные клетки, %	98,91±1,05	98,75±1,69	98,43±1,61	98,85±1,36
Клетки в событии митоза, %	2,25±1,11	1,93±1,03	2,18±0,93	2,22±1,06
Средняя площадь 1 клетки, мкм <sup>2</sup>	127,96±29,78	141,46±31,20	133,21±24,34	129,91±22,88
Число клеток на 10 <sup>3</sup> мкм <sup>2</sup> , шт	3,30±1,43	3,18±1,29	3,29±1,65	2,91±1,54
Клеточная линия/ Тип НЧ	BJ-5ta/ZnO			
Жизнеспособные клетки, %	97,08±1,59	96,03±1,97*	96,86±1,49	95,78±1,77*
Клетки в событии митоза, %	2,22±0,97	1,64±0,85*	2,12±1,00	1,34±0,46*
Средняя площадь 1 клетки, мкм <sup>2</sup>	135,33±24,24	146,71±24,74	124,78±22,05	132,38±26,95
Число клеток на 10 <sup>3</sup> мкм <sup>2</sup> , шт	4,09±1,05	6,73±1,33*	3,96±0,81	4,33±1,54

\* — статистически значимые различия по сравнению с группой «Контроль»,  $p < 0.05$ , критерий Манна-Уитни.

Таким образом, было показано, что добавление наночастиц Ag<sub>2</sub>O в концентрациях 0.01 %, 0.001 %, 0.0001 % не приводило к статистически значимым изменениям параметров функционирования клеток NaCaT. Отмечалась тенденция к снижению числа клеток на единицу площади.

Добавление наночастиц ZnO в концентрациях 0.01% и 0.0001% в культуральную среду клеток VJ-5ta приводило к достоверному снижению доли жизнеспособных клеток, частоты событий митоза, а также сокращению числа клеток на единицу площади. Было показано, что наночастицы оксида цинка (ZnO) являются более токсичными по отношению к постоянной клеточной линии, чем наночастицы оксида серебра (I) ( $\text{Ag}_2\text{O}$ ). Данное наблюдение представляет большой интерес и требует дальнейшего более детального изучения. Использование первичных клеточных культур вместо иммортализованных клеточных линий даст возможность более детально исследовать цитотоксическое воздействие рассматриваемых наночастиц оксидов металлов, в том числе, влияние на морфологию клеток.

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.б.н. Гудкову С.В. за помощь в постановке научной задачи и обсуждение результатов, а также коллеге Серову Д.А за помощь в обработке данных.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-02-00061\_a и грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МД-2128.2020.11.

**Лазерная масс-спектрометрия  
летучих органических соединений  
мочи детей с врождёнными уropатиями**

**Бухарина А.Б.<sup>1</sup>, Яковлев В.В.<sup>2</sup>, Пенто А.В.<sup>1</sup>**

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

*2- Первый Московский государственный медицинский университет  
им. И.М. Сеченова (Сеченовский Университет), Москва*

*E-mail: [Ay15@mail.ru](mailto:Ay15@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-103-105

Интенсивное развитие «омиксных» технологий и их применение в биомедицинской науке и медицинской диагностике, в частности для раннего выявления социально значимых заболеваний, является в настоящее время общемировым трендом [1]. В частности, перспективным представляется подход, опирающийся на масс-спектрометрический анализ комплекса выделяемых человеком *летучих органических соединений* (ЛОС). Комплекс ЛОС несет информацию о состоянии индивидуума, которая может быть использована для диагностики заболеваний. ЛОС — это широкий класс органических соединений, которые отличаются потенциалом ионизации, спектром поглощения оптического излучения, энергией средства к протону и электрону. Эффективность подхода определяется получением ионов максимально широкого круга соединений, поэтому поиск метода, обеспечивающего ионизацию максимального количества соединений, является в этом контексте ключевой задачей. Для решения этой проблемы авторами был предложен *метод получения ионов органических соединений при атмосферном давлении* — *Atmospheric pressure laser plasma ionization* (APLPI), основанный на использовании жесткого УФ излучения лазерной плазмы, создаваемой импульсным лазером на поверхности металлической мишени [2, 3]. Такой подход позволяет одновременно обеспечить фотоионизацию как молекул воды, кислорода, азота, так и любых органических соединений, не приводя к их значительной фрагментации. Подход позволяет анализировать объекты «как они есть», то есть отказаться от предварительной



подготовки образцов и использовать масс-анализатор с непосредственным вводом ионов из области ионизации при атмосферном давлении, что позволяет сократить время анализа [4].

Для получения ионов ЛОС в работе использовалась плазма, создаваемая импульсным излучением Nd:YAG лазера с энергией в импульсе  $E_{imp} = 250$  мкДж, длительностью импульса  $\tau = 500$  пс и частотой повторения импульсов  $f = 100$  Гц. Исследование проводилось в инертной среде (аргон) при атмосферном давлении.

В эксперименте использовались пробы мочи 49 мальчиков (возраст 1–17 лет): 30 детей с врожденными уropатиями (пузырно-мочеточниковый рефлюкс, мегауретер, гидронефроз) и 19 детей без заболеваний мочевыделительной системы (дети с малой хирургической патологией), которые составили контрольную группу. Нормальная скорость клубочковой фильтрации была критерием включения пациентов в исследование. Сбор проб мочи осуществлялся до начала лечения.

В регистрируемом в масс-спектрах диапазоне масс 1–300 а.е.м. было выделено 214 уникальных пиков, которые присутствуют почти во всех образцах. Для выделения из полученного массива данных пиков, содержащих информацию о наличии или отсутствии заболевания, ко всему массиву данных был применен метод одностороннего дисперсионного анализа. Диаграммы для пика с  $m/z = 127$  приведены на рис. 1.

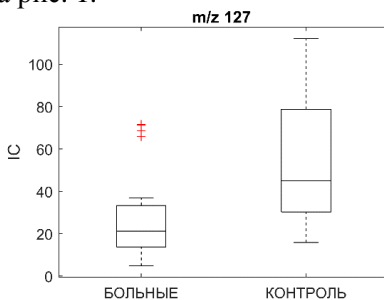


Рис. 1. Коробчатые диаграммы ионного тока  $m/z = 127$ .

Дисперсионный анализ показал, что в массиве из 214 пиков существует всего 14 пиков с  $p < 0.01$ , по которым можно отличить одну группу от другой. Амплитуда большинства из этих пиков в образцах мочи, полученных от больных детей ниже, чем у контрольной группы. К четырнадцати полученным пикам был

применен метод главных компонент. Результат приведен на рис. 2.

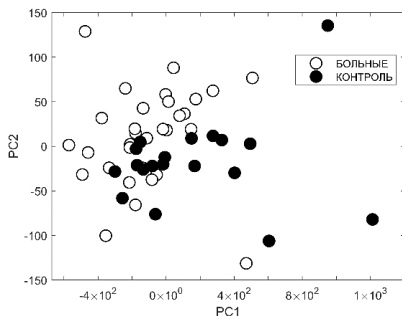


Рис. 2. Построение в первых двух главных компонентах.

Как видно из рисунка, наблюдается разделение точек, соответствующих больным и здоровым пациентам, что подтверждает предположение о значимости выделенных пиков для диагностики заболевания. Улучшить степень разделения в первом эксперименте можно путём сужения возрастного диапазона и увеличения объёма контрольной группы.

Применение анализа ЛОС образцов без пробоподготовки, в состоянии «как они есть», на наш взгляд является перспективным направлением, которое при решении технических проблем может обеспечить новое направление в диагностике заболеваний. Это исследование демонстрирует потенциал летучей метаболомики для диагностики болезней.

Авторы выражают благодарность научным руководителям к.ф.-м.н. Никифорову Сергею Михайловичу и д.м.н. Морозовой Ольге Леонидовне за постановку научной задачи и обсуждение результатов.

1. Лисица А.В., Пономаренко Е.А., Лохов П.Г. и др. Вестн. РАМН, 2016, **71**, 255.
2. Pento A.V., Nikiforov S.M., Simanovsky Y.O. et al. Quantum Electron. 2013, **41**(1), 55.
3. Pento A.V, Bukharina A.B., Nikiforov S.M. et al. International Journal of Mass Spectrometry. 2021, **461**, 116498.
4. Bukharina A.B., Kochevalina M.Y., Pento A.V. et al. IEEE. 2020, 1

## **Влияние фторполимерной пленки, модифицированной наноразмерным фотолюминофором, на рост и развитие растений**

**Иваниук В.В.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-106-108

Известно, что для получения энергии в процессе фотосинтеза растения используют преимущественно кванты красной и синей части спектра. Более того, кванты красного света стимулируют фотосинтез интенсивнее, чем кванты синего света. Для многих культур, выращиваемых в условиях закрытого грунта в зоне рискованного земледелия, среднесуточной интенсивности красной и сине-фиолетовой части спектра обычно хватает только в ясные летние дни [1, 2]. Для повышения продуктивности теплиц в северных широтах была разработана технология получения фторполимерных плёнок с фотоконверсионными наночастицами (квантовыми точками), которые преобразуют УФ-излучение и фиолетовый свет в красный свет. Использование фотоконверсионных фторполимерных плёнок способствует увеличению биомассы растений, выращиваемых в теплицах высоких широт.

Было проведено исследование фотоконверсии части УФ-излучения, не используемого растениями, и излучения в фиолетовой части спектра в излучение в красной части спектра. Наночастицы с экситонной эмиссией использовались в качестве центров фотоконверсии. Квантовые точки  $\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Se}$  являются одними из наиболее технологичных материалов для производства фотоконверсионных наночастиц. Варьируя размер таких наночастиц, можно сдвигать максимум их флуоресценции во всем видимом диапазоне спектра. Была использована низкотемпературная технология включения таких наночастиц во фторполимерные плёнки. Проявленная плёнка позволяет значительно повысить продуктивность закрытых почв, расположенных в высоких широтах.

Размер *квантовых точек* (КТ) от 6.5 до 8.5 нм. Также были

исследованы спектры фотолюминесценции КТ в ацетоне и фторполимере. Возбуждение осуществлялось с помощью диода на длине волны 375 нм. Когда свет проходит через фторполимер, не содержащий КТ, базовый спектр лампы не претерпевает значительных изменений. Когда свет проходит через фторполимер, содержащий КТ, к спектру лампы добавляется пик люминесценции с максимумом излучения 650 нм. Таким образом можно утверждать, что данное фотоконверсионное покрытие позволяет получить спектр с наложением на него «красного» компонента.

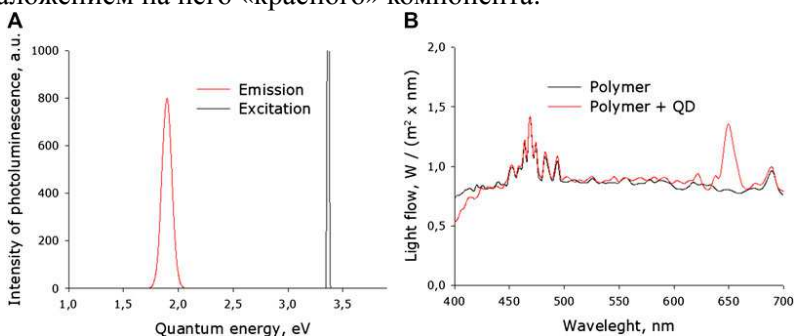


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции КТ(А). Спектр фотолюминесценции фотоконверсионных наночастиц в ацетоне(В). Спектр фотолюминесценции фторполимера, содержащего и не содержащего фотоконверсионных наночастиц. Люминесценция возбуждалась ксеноновой лампой и диодным источником ( 375 нм).

Фотоконверсионные фторполимерные пленки оказывают наибольшее влияние на развитие растений перца и томата и наименьшее — на растения огурца и тыквы. Перец и помидоры относятся к семейству *паслёновых*, огурец и тыква принадлежат к семейству *тыквенных*. Известно, что структура светособирающего комплекса может различаться у разных семейств растений. Вероятно, что, изменяя длину волны фотолюминесценции КТ, можно добиться увеличения скорости накопления биомассы не только у растений семейства *паслёновых*, но и у растений других семейств.

Площадь листьев тыквы, перца и томата, выращенных под фотоплимерными пленками, на 25, 30 и 50% соответственно выше, чем у контрольных растений. Наибольшее влияние на скорость роста наблюдается у растений томата. На рисунке показана динамика изменения листовой поверхности томатов, выращенных под

контрольной и фотоконверсионной пленкой, у которой к концу 4-недельного вегетационного периода площадь листьев значительно больше, чем в контрольной группе. К концу пятой недели вегетации разница достигает в среднем почти 50%. Помимо этого, использование фотоконверсионных пленок позволяет получить на 20% больше ягод томатов.

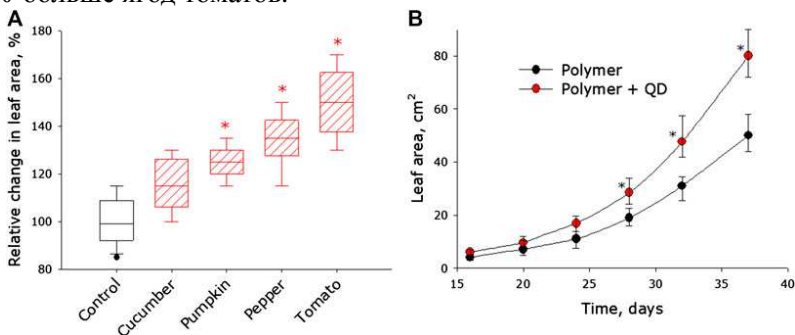


Рис. 2. Влияние фотоконверсионной фторполимерной пленки на рост и развитие растений различных видов. (А) Влияние фотопреобразовательной полимерной пленки на размер листьев огурца (*Cucumis sativus*), тыквы (*Cucurbita pepo*), перца (*Capsicum annuum L.*), томата (*Solanum lycopersicum*). (В) Динамика изменения площади листа контрольных растений томата и томатов, выращенных под фотоконверсионной полимерной пленкой.

Вероятно, спектр фотоконверсионной фторполимерной плёнки оптимален для роста растений томата на стадии прорастания, но на более поздних этапах онтогенеза требует коррекции.

1. Sæbø A, Krekling T, Appelgren M. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 1995, **41**, 177–85.
2. Kuleshova T.E., Likhachev A.I., Pavlova E.S., et al. *Tech Phys.* 2018, **63**, 1243–47.

## Лазерная скаттерометрия жирности молока

**Игнатенко Д.Н.**

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

*E-mail: [DmitriyEK13104@yandex.ru](mailto:DmitriyEK13104@yandex.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-109-110

Методы неразрушающей диагностики микро- и наноструктуры жидкостных дисперсных систем находят новые применения для технологического контроля во многих отраслях. Одним из критичных требований к автоматизации процессов в пищевой промышленности является постоянная оценка состава и физических свойств жидкостей и их смесей на наиболее важных этапах обработки. Однако, определение физических характеристик пищевых продуктов с использованием традиционных методов мониторинга затруднено в том случае, если анализируемый продукт находится в полидисперсном состоянии, т.е. содержит частицы различного размера и формы. На основе оптических методов возможна разработка надёжных и универсальных датчиков для неинвазивного контроля состава продуктов в реальном времени.

В настоящее время точное измерение концентрации молочного жира осуществляется, например, с помощью систем, основанных на пропускании/отражении инфракрасного излучения (IFIR), которые отличаются высокой стоимостью. В соответствии с современными требованиями измерения содержания жира в молоке должны иметь точность приблизительно 0.02 %. Поэтому менее дорогая система для измерения содержания жира, отличающаяся компактностью и простотой в калибровке в сочетании с повышенным уровнем точности, имела бы преимущества с точки зрения снижения затрат на переработку молока и улучшения контроля качества.

Перспективным направлением в разработке таких систем являются методики, основанные на измерении характеристик светорассеяния (скаттерометрия). Например, в работе [1] сообщается о разработке недорогих волоконных датчиков, измеряющих обратное рассеяние (диффузное отражение) многократно рассеивающих жидкостей. Кроме того, в [2] утверждается, что аналогичные датчики могут использоваться для определения содержания молочного жира в

обезжиренном молоке. Однако, в этих работах не учитывалось изменение состояния поляризации при рассеянии в среде. Методика, в которой вдобавок к интенсивности светорассеяния измеряются изменения поляризации рассеянного света, может предоставить дополнительную информацию о рассеивающих частицах и повысить точность измерения дисперсного состава. В частности, угловые зависимости элементов *матрицы рассеяния света* (МРС) позволяют определять количество и распределение частиц по размерам, а также отличать сплошные частицы от кластеров, состоящих из более мелких частиц. Как следует из литературы, метод МРС может быть применён для анализа различных биоорганических дисперсных систем, таких как молоко, почвенные суспензии, белковые растворы и другие [3–6].

Автор выражает благодарность научному руководителю, д.б.н. Гудкову С.В., к.ф.-м.н. Шкирину А.В. и к.ф.-м.н. Чирикову С.М. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. G.H. Meeten and P. Wood. Meas. Sci. and Tech. 1993, **4**(6), 643–648.
2. C.L. Crofcheck, F.A. Payne, C.L. Hicks, et al. J. Food Process Eng. 2000, **23**(2), 163–175.
3. C.L. Crofcheck et al. Transactions of the ASAE. 2005, **48**(3), 1147–1155.
4. N.F. Bunkin et al. ACS OMEGA. 2020, **5**(51), 33214–33224.
5. H. Ding et al. Journal of Biomedical Optics. 2007, **12**(3), 034032.
6. S.N. Chirikov, A.V. Shkirin Opt. Spectrosc. 2018, **124**, 575–584.

## Исследование эффективности фотодинамической терапии по времени жизни флуоресценции хлорина еб

**Куличенко А.М.<sup>1,2</sup>, Фаррахова Д.С.<sup>1</sup>,  
Романишкин И.Д.<sup>1</sup>, Маклыгина Ю.С.<sup>1</sup>**

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

2- *Национальный исследовательский ядерный университет  
«Московский инженерно-физический институт», Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-111-112

Современным неинвазивным методом лечения онкологических заболеваний является *фотодинамическая терапия* (ФДТ). Она имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными методами лечения (например, минимальная инвазивность и отсутствие побочных эффектов, сохранение органов и тканей). Интенсивность воздействия на опухоль во время ФДТ определяется концентрацией препарата — *фотосенсибилизатора* (ФС), накопившегося в опухоли, и дозой лазерного облучения, зависящей от плотности мощности лазерного излучения и времени воздействия. На сегодняшний день избыточное или недостаточное лечение, способное привести к образованию вторичных опухолей, по-прежнему остаётся одной из основных проблем ФДТ из-за отсутствия надёжных методов флуоресцентного мониторинга доз лазерного воздействия в реальном времени. Измерение кинетики затухания флуоресценции ФС, накопленного в опухолевой ткани, а также измерение кинетики затухания автофлуоресценции клеток позволяет определить биохимические процессы, протекающие в исследуемой области после облучения и точно оценить необходимость дополнительного облучения.

Целью данной работы является разработка спектрально-флуоресцентной методики определения эффективности проведения ФДТ по времени жизни автофлуоресценции клеточных структур и флуоресценции хлорина еб, накопленного в опухолевых клетках.

Исследование проводилось на культуре клеток карциномы Эрлиха с помощью ФС на основе хлорина еб. Инкубация монослоя клеток с концентрацией хлорина еб 5 мг/кг и 10 мг/кг проводилась в течение 3 и 4 часов при температуре 37 °С и с содержанием CO<sub>2</sub> 5 %. Накопление хлорина еб в клетках контролировалось флуоресцентным



методом с помощью спектрометра ЛЭСА-01-БИОСПЕК (Биоспек, Россия) и при помощи конфокальной микроскопии со спектральным разрешением ( $\lambda$  mode,  $\lambda = 633$  нм). Исследование кинетики затухания флуоресценции хлорина еб в монослое опухолевых клеток на чашках Петри проводилось при помощи конфокального микроскопа LSM-710 (Carl Zeiss, Германия) с приставкой FLIM SPC 150 TCSPC (Becker & Hickl, Германия) при двухфотонном возбуждении 810 нм и в снятой в эпипендорф популяции клеток при помощи стрик-камеры Hamamatsu C10627-13 (Hamamatsu, Япония) при возбуждении 637 нм. Кинетики затухания флуоресценции были аппроксимированы экспоненциальной кривой с двумя компонентами времени жизни флуоресценции.

Были получены спектры флуоресценции хлорина еб, накопленного в опухолевых клетках, исследована автофлуоресценция органелл клеток. Проанализированы спектры до и после проведения ФДТ, оценён фотобличинг ФС для получения эффективной дозы фотодинамического воздействия. Получено пространственное распределение времени жизни флуоресценции хлорина еб в клетках. Усредненный сигнал времени жизни флуоресценции хлорина еб с популяции клеток получен с помощью стрик-камеры.

Проведенные исследования показали уменьшение интенсивности флуоресценции ФС после ФДТ и увеличение интенсивности флуоресценции *флавинадениндинуклеотида* (ФАД). Повышение сигнала флуоресценции ФАД свидетельствует о начале процесса клеточной гибели, приводящего к полной деструкции опухолевой ткани. По данным аппроксимации кинетики затухания флуоресценции определены обе компоненты экспоненциальной кривой: среднее время жизни флуоресценции хлорина еб составило 2.7 нс, в то время как среднее время жизни флуоресценции ФАД составило 0.7 нс. Таким образом, за счет различного времени жизни, по соотношению интенсивностей этих компонент можно неинвазивно оценить эффективность проведенной фотодинамической терапии.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, д.ф.-м.н. Лощену В.Б. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Melissa C. Skala, Kristin M. Ricking, et al. Medical Sciences. 2007, **49**(104), 19494–19499.
2. Rupsa D., Tiffany M. Heaster, Joe T. Sharick, et al. J. Biomed. Opt. 2020, **25**(7), 071203.

**Лазерно-индуцированная десорбция/ионизация  
на поверхности оксида молибдена  
для определения пестицида тетраметилтиурамдисульфида**

**Лаптинская П.К.<sup>1</sup>, Кузьмин И.И.<sup>2</sup>**

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

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-113-115

Целью исследований является разработка нового способа высокочувствительного определения пестицида *тиурама* (тетраметилтиурамдисульфида, ТМТД) в пробах сложного состава. Стандартные способы, основанные на кислотном разложении тиурама до дисульфида и последующем определении  $CS_2$  методами спектрофотометрии или газовой хроматографии, трудоёмки, имеют низкую чувствительность и селективность. Поэтому разработка нового, более эффективного способа определения тиурама является весьма актуальной задачей.

В работе предложен новый подход, который основан на переводе тиурама в комплексное соединение путём его взаимодействия с ионами переходных металлов, ионизации полученного комплекса *методом лазерно-индуцированной десорбции/ионизации с переносом электрона* (*Laser-induced Electron Transfer Desorption/Ionization, LETDI*) и детектировании ионов времяпролетным масс-анализатором [1, 2].

Десорбцию/ионизацию проводили излучением третьей гармоники импульсного Nd:YAG лазера на длине волны 355 нм (длительность импульса 0.35 нс, частота повторения импульсов 100–300 Гц).

В качестве одного из наиболее эффективных эмиттеров молекулярных ионов органических комплексов ТМТД с переходными металлами в ряду исследованных материалов (кремний, графит, ряд металлов и их оксидов) была определена подложка со специально приготовленным поверхностным слоем оксида молибдена.

### Основные результаты работы:

1. Разработан воспроизводимый способ формирования эффективных эмиттеров молекулярных ионов органических комплексов ТМТД с поверхностным слоем оксида молибдена, основанный на термическом окислении металлических пластин молибдена в воздухе путём нагрева в пламени (турбо режим) пропановой горелки.

2. Исследованы зависимости величины выхода ионов комплексов ТМТД от энергии импульсов лазерного излучения. Зависимости характеризуются начальным участком экспоненциального роста сигнала при увеличении плотности энергии с последующим выходом сигнала на насыщение (рис. 1).

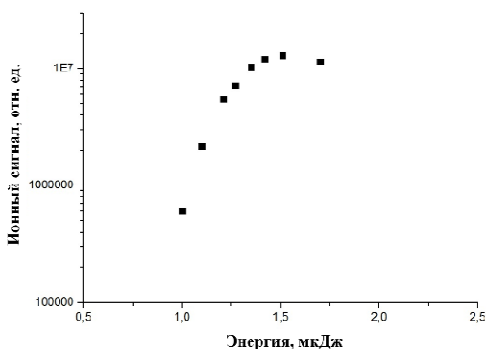


Рис. 1. Зависимость ионного сигнала тиурамата золота от энергии импульсов лазерного излучения

3. Проведено сравнительное исследование эффективности ионизации комплексных соединений тиурама с различными металлами-комплексообразователями (золото, медь, серебро и ртуть). Установлено, что максимальной эффективностью ионизации в ряду исследованных металлов характеризуются комплексы ТМТД с золотом.

4. Получены градуировочные зависимости для количественного определения тиурамов. Установлено, что градуировочные зависимости линейны в диапазоне от 5 до 200 пг комплексного соединения, введенного в прибор.

5. Разработанный способ апробирован для определения тиурама в соках. Методика основана на комплексовании пестицида с золотом

в кислой среде с дальнейшей экстракцией полученного соединения в хлороформ. Раствор, содержащий комплекс, капельно наносится на LETDI-подложку с поверхностным слоем оксида молибдена для дальнейшего определения. Для тиурамата золота предел обнаружения составляет примерно 1 пг вещества, введённого в прибор. Сравнение полученных результатов с литературными данными показало, что разработанный способ определения тиурама превосходит по чувствительности стандартные методы более чем на два порядка величины.

Авторы выражают благодарность научным руководителям д.х.н. Гречникову А.А. и к.ф.-м.н. Никифорову С.М. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Лаптинская П.К., Кузьмин И.И., Гречников А.А. Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. — Т. 4. — Санкт-Петербург, 2019. — С. 281–281.
2. Лаптинская П.К., Кузьмин И.И., Пенто А.В. Масс-спектрометрия с лазерно-индуцированной десорбцией/ионизацией для высокочувствительного детектирования органических комплексных соединений металлов // Школа молодых учёных «Прохоровские чтения». Школа-конференция молодых учёных «Прохоровские недели». Тезисы докладов. — «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Москва, 2019. — С. 16–17. (DOI:10.24411/9999-033A-2019-00006)

**Классификация белковых (пептидных) лигандов  
никотиновых ацетилхолиновых рецепторов  
с использованием рамановской спектроскопии и  
метода главных компонент**

**Можаева В.А.<sup>1,2</sup>, Кудрявцев Д.С.<sup>2</sup>**

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

*2- Институт биоорганической химии им. М.М. Шемякина и  
Ю.А. Овчинникова Российской академии наук, Москва*

*E-mail: [1996-racer@mail.ru](mailto:1996-racer@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-116-118

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) света или рамановская спектроскопия — многообещающий метод изучения и идентификации белков. Существенным преимуществом этого метода является лёгкость пробоподготовки или её полное отсутствие, а также, в случае использования сухих образцов, экономичность метода. Упомянутые преимущества, наряду с информативностью данного метода, в частности, возможностью получения уникальной информации о вторичной и третичной структуре белков, делают рамановскую спектроскопию чрезвычайно полезной техникой для быстрого анализа труднодоступных в больших количествах, зачастую необходимых для исследований другими методами образцов белков (пептидов). Но, так как КР спектр типичного белка сложен для прямой интерпретации, для обеспечения быстрого анализа крайне полезна автоматическая обработка спектров. *Метод главных компонент* (МГК) позволяет упростить процедуру анализа данных за счёт уменьшения их размерности. Этот метод представляется перспективным в случае анализа спектров белков: в результате использования МГК становится возможным выявить ключевые различия в спектрах.

Существует ряд белковых (пептидных) токсинов, полученных от разных животных, которые являются лигандами никотиновых ацетилхолиновых рецепторов. Эти токсины могут различаться по механизму действия и, соответственно, иметь разные особенности строения. Данные токсины представляют интерес, в том числе с медицинской точки зрения, например, они являются потенциальными

миорелаксантами [1]. Белковые и пептидные токсины весьма разнообразны, и, зачастую, получение их в больших количествах крайне затруднено в виду сложности структуры и малого содержания в цельном яде. В свете вышесказанного, рамановская спектроскопия в сочетании с МГК может быть особенно полезна для анализа таких белков (пептидов).

В настоящем исследовании МГК использовался для анализа ряда спектров КР сухих образцов токсинов и их мутантов. Наглядный результат МГК, применённого к предварительно обработанным спектрам, представлен на рисунке 1.

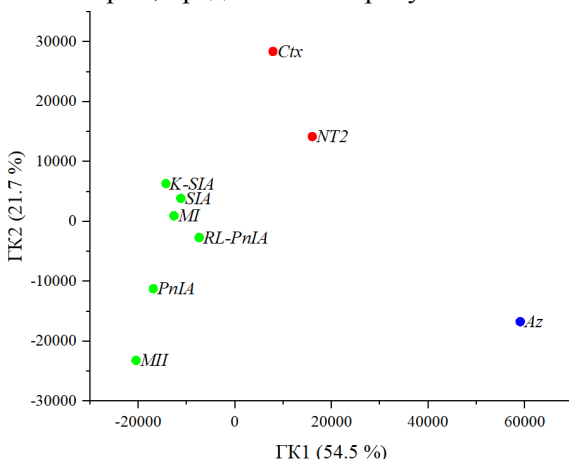


Рис. 1. Величины первой и второй главных компонент (ГК1, ГК2) (в скобках указан процент объясненной дисперсии).

Данный график достаточно чётко демонстрирует разделение образцов на три группы, что согласуется с данными о природе и структуре токсинов. Для более детального анализа отношений между образцами, к полученным в результате применения МГК данным был применён иерархический кластерный анализ. Результат анализа в виде дендрограммы приведён на рисунке 2а. Используя биоинформатический сервис, также было построено дерево, отражающее сходство аминокислотных последовательностей токсинов (рисунок 2б). Входные данные для расчёта дерева даны на рисунке 3. Кластеризация обоими методами дает схожие результаты, за исключением положений токсина PnIA и его мутанта RL-PnIA. Это объясняется тем, что, несмотря на схожесть их последовательностей

(отраженную в рассчитанном дереве), эти два токсина различаются по своей структуре.

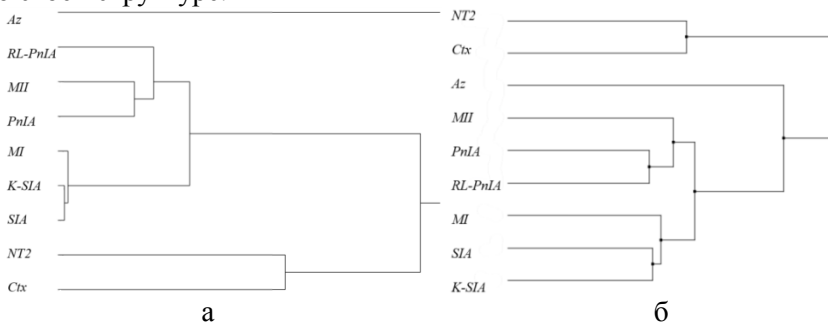


Рис. 2. Дендрограмма отношений между образцами (а), полученная на основании иерархического кластерного анализа и дерево, отражающее сходство аминокислотных последовательностей токсинов (б).

Этот факт выявляется из анализа рамановских спектров и не обнаруживается простым сравнением последовательностей образцов, что демонстрирует преимущество рамановской спектроскопии в анализе структурных особенностей белков (пептидов).

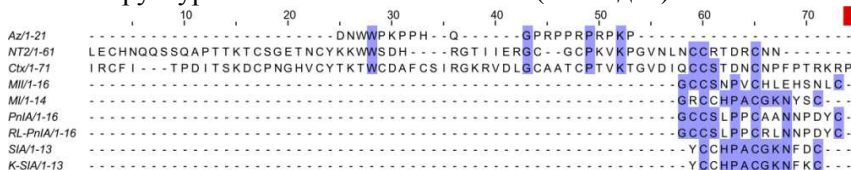


Рис. 3. Аминокислотные последовательности токсинов. Выделены идентичные аминокислоты, которые встречаются в одних и тех же положениях в выровненных последовательностях в трёх или более образцах.

Таким образом, с помощью описанного метода нам удалось разделить функционально схожие белки на группы в соответствии с их структурными особенностями, которые коррелируют с их биологическим происхождением.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. Прохорову К.А. за неоценимую помощь в записи спектров и полезные советы.

1. Shelukhina I.V., Zhmak M.N., Lobanov A.V., et al. Toxins. 2018, **10**(1), 34.

## **Влияние длины сопряжения, структуры боковых и концевых групп, типа изомера на спектры комбинационного рассеяния каротиноидов**

**Новиков В.С.**

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

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-119-121

Каротиноиды выполняют важнейшие защитные функции в организме человека, обладают провитаминами, иммуностимулирующими и лечебно-профилактическими свойствами [1]. Свойства каротиноидов (провитаминная активность, биодоступность, антиоксидантные свойства) зависят от химической структуры и изомерного состава молекул. Резонансное усиление интенсивности линий комбинационного рассеяния (КР) полиенов при возбуждении спектров излучением видимого диапазона позволяет детектировать каротиноиды в очень малых концентрациях [2]. На данный момент методы спектроскопии КР для определения содержания, химического и изомерного состава каротиноидов в биотканях или смесях плохо развиты.

Целью данной работы являлся теоретический анализ влияния длины сопряжения, структуры боковых и концевых групп, а также типа изомера на спектр КР каротиноидов. Впервые исследованы спектры КР всех изомеров  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -каротинов и ликопина. Эти соединения имеют одинаковую химическую формулу  $C_{40}H_{56}$ , но содержат разные концевые группы. Как следствие, длина сопряжения и число возможных изомеров для этих каротиноидов разные.

Для моделирования структуры и спектров КР каротиноидов использовалась теория функционала плотности. Расчёты проводились в некоммерческой программе «Природа» с использованием функционала OLYP и расширенного базиса гауссова типа 4z.bas [3].

В спектрах  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -каротинов и ликопина наблюдаются две интенсивные линии около  $1150$  и  $1520\text{ см}^{-1}$ , отвечающие соответственно валентным колебаниям C–C- и C=C-связей в



полиенах. Малоинтенсивная линия около  $1000\text{ см}^{-1}$  соответствует деформационным колебаниям боковых  $\text{CH}_3$ -групп. С увеличением длины сопряжения в молекулах каротиноидов наблюдаются монотонный сдвиг в низкочастотную область и увеличение интенсивности линий валентных колебаний  $\text{C}-\text{C}$ - и  $\text{C}=\text{C}$ -связей. Эти закономерности находятся в соответствии с результатами расчёта для полиенов [3]. Для валентного колебания  $\text{C}-\text{C}$ -связей происходит монотонное перераспределение интенсивностей линий в дублете.

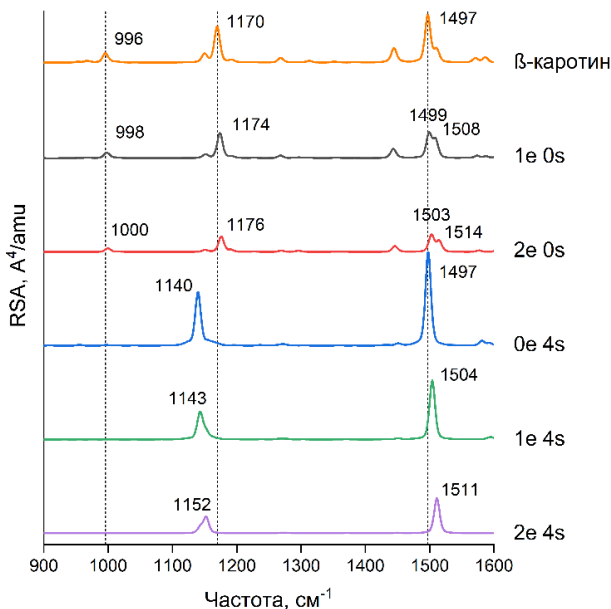


Рис. 1. Рассчитанные спектры КР для *транс*-изомеров молекул  $\beta$ -каротина и модифицированных молекул  $\beta$ -каротина: число перед буквой “e” соответствует количеству концевых групп (иононовых колец), заменённых на группу  $\text{CH}_3$ , число перед буквой “s” соответствует количеству боковых групп ( $\text{CH}_3$ -групп), заменённых на атом Н.

Рисунок 1 демонстрирует рассчитанные спектры КР модифицированных молекул  $\beta$ -каротина. При удалении концевых групп в молекуле  $\beta$ -каротина уменьшается длина сопряжения, и, как следствие, линии валентных колебаний  $\text{C}-\text{C}$ - и  $\text{C}=\text{C}$ -связей

сдвигаются в высокочастотную область, а их интенсивность уменьшается.

При удалении боковых групп в молекуле  $\beta$ -каротина частота валентного колебания С=C-связей не меняется, так как не меняется длина сопряжения, а частота валентного колебания С–С-связей значительно смещается в низкочастотную область спектра. Исчезает расщепление линий, отвечающих валентным колебаниям С–С- и С=C-связей, и пропадает линия КР около  $1000\text{ см}^{-1}$ , соответствующая деформационным колебаниям боковых  $\text{CH}_3$ -групп. При этом интенсивности линий КР значительно возрастают, что объясняется выпрямлением полиеновой цепи и исчезновением расщепления линий.

Для ликопина удаление концевых групп не приводит к изменению длины сопряжения, и, как следствие, частота валентного колебания С=C-связей не меняется. При удалении концевых групп валентное колебание С–С-связей немного сдвигается в область высоких частот, и интенсивность линий, отвечающих валентным колебаниям С–С- и С=C-связей, уменьшается. Этот эффект объясняется изменением массы концевых групп и подтверждается результатами моделирования для полиенов с различными концевыми группами.

Как и в случае  $\beta$ -каротина, удаление боковых групп в молекуле ликопина приводит к уменьшению частоты валентных колебаний С–С-связей, исчезновению расщепления и возрастанию интенсивности линий, отвечающих валентным колебаниям С–С- и С=C-связей, и исчезновению линии около  $1000\text{ см}^{-1}$ .

Результаты моделирования также показали, что спектры КР *транс*- и *цис*-изомеров каротиноидов значительно отличаются, что потенциально позволяет различать эти вещества по спектрам КР.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-32-90172. Автор выражает благодарность Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН за предоставленные вычислительные ресурсы.

1. Elvira-Torales L.I., et al. Antioxidants. 2019, **8**(7), 229.
2. Darwin M.E. et al. Laser Phys. 2004, **14**(2), 231–233.
3. Novikov V.S. et al. Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc., 2021, **255**. 119668.

## Детектирование триметиламинамин оксида в плазме крови человека с помощью планарных ГКР-структур

**Новиков Д.В.<sup>1</sup>, Савицкий А.И.<sup>1</sup>, Дубков С.В.<sup>1</sup>, Тарасов А.И.<sup>1</sup>,  
Бурко А.<sup>2</sup>, Завацкий С.<sup>2</sup>, Гирель К.<sup>2</sup>**

1- Национальный исследовательский университет

«Московский институт электронных технологий», Москва

2- Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, Минск

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-122-123

В настоящее время эффект *гигантского комбинационного рассеяния* света (ГКР) применяется в химии, биологии и медицине. Наблюдается большая активность исследователей в попытках раннего обнаружения заболеваний по анализу крови и других биологических жидкостей, а также применения ГКР в различных областях для детектирования низких концентраций целевых аналитов. Одним из таких аналитов является *триметиламин оксид* (ТМАО), концентрация которого выше 2 мкМ в крови человека является маркером высокого риска возникновения сердечно-сосудистых заболеваний и инсульта [1, 2]. На сегодняшний день ТМАО определяют методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, однако, данный метод обладает значительной стоимостью анализа и требует большого количества времени для его проведения. Альтернативным методом детектирования ТМАО является ГКР спектроскопия, с помощью которой возможно создать более дешевый и быстрый подход к обнаружению этого аналита для использования в персонализированной медицине, активно развивающейся на сегодняшний день. Целью данной работы является проверка возможности детектирования микромолярных концентраций ТМАО в плазме крови методом спектроскопии комбинационного рассеяния света и применения структур ГКР.

В данной работе использовались ГКР-подложки со следующей планарной структурой: пластина Si (100) с оксидным слоем 300 нм; светоотражающий Me слой 100 нм; прозрачный диэлектрический слой SiO<sub>2</sub>; слой наночастиц Me дискообразной формы со средним

диаметром ~40 нм. В качестве Me использовались Ag и Au. Аналиты представляли собой водные растворы ТМАО 0.5 микро-, мили- и нормальной молярной концентрации, а также плазмы крови шести разных людей. Нанесение аналитов на ГКР-подложку производилось с помощью дозатора ЭКОХИМ в виде капель объёмом 4 мкл. Исследования проводились на спектрометре комбинационного рассеяния LabRAM HR Evolution на длинах волн 514 и 633 нм, с мощностью лазера от 0.005 до 0.5 мВт и фокусной линзой  $\times 100$ . Дополнительным этапом исследований была поляризационная сушка: в вытяжном шкафу ГКР-подложка с каплей жидкого аналита помещалась на анод, над которым на расстоянии 2 см располагался катод, после чего на электроды подавалось смещение 50 В. Для обработки полученных спектров использовалась программа KnowItAll Academic Edition.

Результаты исследований показали, что для спектроскопического анализа ТМАО-содержащих растворов следует использовать ГКР-подложки на основе Ag, лазеры с длиной волны 514 нм и мощностью не более 0.25 мВт. Использование ГКР-подложек на основе Au или лазеров 633 нм обеспечивает меньшее качество спектра и на 1–2 порядка снижает максимальную интенсивность. Сушка аналита в присутствии электрического поля позволила увеличить интенсивность ряда пиков ТМАО в 6 раз. Исследования плазмы крови показали, что максимальная разница интенсивности пиков ТМАО между двумя пациентами может превышать 2 раза. Из работы следует, что спектроскопия комбинационного рассеяния с использованием ГКР-подложек может быть применена для определения уровня ТМАО в плазме крови человека, при наличии эталонного образца.

Авторы выражают благодарность научному руководителю, профессору, д.т.н. Громову Д.Г. за постановку научной задачи и помощь в обсуждении результатов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00761).

1. Al-Obaide M.A.I., Singh R., Datta P., et al. J. Clin. Med. 2017, **19**, 86.
2. Rexidamu M., Li H., Jin H., et al. Biosci. Rep. 2019, **39**, 10.

## Использование коэффициента асимметрии для автоматической оценки кальциевых ответов клеток

**Серов Д.А.<sup>1,2</sup>**

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

*2- Институт биофизики клетки Российской академии наук, Пущино*

*E-mail: [dmitiry\\_serov\\_91@mail.ru](mailto:dmitiry_serov_91@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-124-126

Цитоплазматический кальций ( $[Ca^{2+}]_i$ ) — ключевой внутриклеточный посредник, регулирующий основные функции, а динамика  $[Ca^{2+}]_i$  служит важной характеристикой функциональной активности клеток. Одной из форм кальциевого ответа является генерация транзистентных сигналов (спайков): быстрый рост с последующим спадом. В настоящее время, активно исследуется участие  $[Ca^{2+}]_i$  в регуляции функционирования электронеозбудимых клеток [1]. Для электронеозбудимых клеток характерно отсутствие синхронного ответа на исследуемый стимул, и лишь малая доля (около 20-30%) клеток демонстрируют кальциевые ответы в ходе экспериментов, что делает необходимым анализ большого числа клеток в каждом эксперименте [2], поэтому необходимо создание автоматизированных методов анализа кальциевых ответов в клетках. Транзистентный сигнал в экспериментальной записи может быть найден путём вычисления статистического момента третьего порядка — *коэффициента асимметрии* ( $As$ ). Рост значения  $As$  ассоциирован с наличием транзистентного сигнала в записи [3]. Формула для вычисления момента  $n$ -го порядка имеет вид:

$$\mu_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^n, \quad (1)$$

где  $\bar{x}$  — среднее арифметическое ряда данных,  $n$  — количество данных. Третий момент  $As$  можно вычислить по формуле:

$$As = \mu_3 / \mu_2^{2/3} \quad (2)$$

Цель данной работы — оценить возможность определения наличия кальциевых спайков в электронеозбудимых клетках с помощью расчета коэффициента  $As$ .

Исследование выполнено на гранулоцитах из костного мозга самцов мышей линии BALB/c, изолированным методом центрифугирования в градиенте плотности перколлала [1]. Эксперименты проведены в соответствии с протоколом Комиссии по правилам обращения с животными №12306 (2006 г.) Института биофизики клетки РАН. Для оценки уровня  $[Ca^{2+}]_i$  клетки окрашивали флуоресцентным зондом Fura-2 AM, флуоресценцию оценивали с помощью трехволновой имиджинг системы [4]. Анализ изображений проводили с помощью программы ImageJ (НИН, США). Расчёт  $A_s$  и анализ популяций проводили с помощью разработанного М.Е. Асташевым программного обеспечения по формуле (2). Величина  $A_s$  описывает форму распределения измеряемой величины, которая зависит от наличия транзientного сигнала [3]. Мы оценили зависимость значения  $A_s$  от формы кальциевого ответа (Рис. 1а). При отсутствии спайка, форма распределения значений F340/F380 симметрична,  $A_s$  близко к нулю (Рис. 1б). При появлении спайка форма распределения значений F340/F380 изменяется, а  $A_s$  растёт.

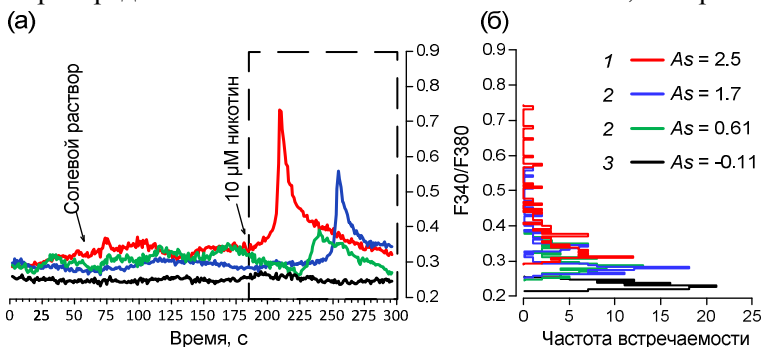


Рис. 1. Зависимость значений коэффициента асимметрии  $A_s$  от наличия кальциевого спайка в клетке. Примеры записей от индивидуальных клеток (а), распределения значений F340/F380 для соответствующих записей (б).

Пунктиром показан проанализированный участок записи.

На основании проанализированных данных нами было выбрано значение  $A_s = 0.6$ , в качестве порога для выделения клеток со спайками ( $A_s \geq 0.6$ ) или без них ( $A_s < 0.6$ ). Используя  $A_s$ , мы смогли в автоматическом режиме определить долю клеток с кальциевыми спайками в разных экспериментальных условиях.

Обнаружено, что ~15 % клеток генерируют кальциевые спайки при добавке раствора без стимулов. ~21 % клеток — в ответ на 10  $\mu\text{M}$  никотин (Рис. 2). Полученные данные указывает на наличие популяции клеток, избирательно чувствительных к никотину (Рис. 2). С помощью разработанного анализа были обнаружены следующие популяции клеток:

- 1) чувствительные к никотину;
- 2) чувствительные только к механическому воздействию;
- 3) чувствительные к обоим воздействиям;
- 4) неактивные всё время эксперимента.

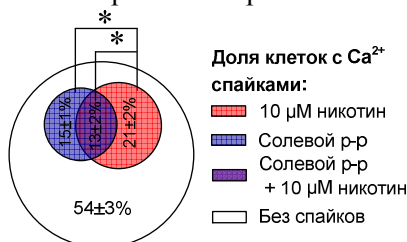


Рис. 2. Доли клеток с кальциевыми ответами в разных экспериментальных условиях. Число всех клеток в поле зрения было взято за 100 %. \* —  $p < 0.05$  по критерию Манна-Уитни ( $n=8$ ).

Разработанный и примененный нами подход позволяет оценивать кальциевые ответы гетерогенных клеточных популяций в автоматическом режиме.

Автор выражает благодарность научному руководителю к.б.н. Асташеву М.Е. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов, а также к.б.н. Тихоновой И.В. и к.б.н. Сафроновой В.Г. за помощь в проведении исследования и обсуждение полученных результатов.

1. Immler R., Simon S.I., Sperandio M., et al. Eur. J. Clin. Invest. 2018, **48**, 2:e12964.
2. Safronova V.G., Vulvius C.A., Astashev M.E., et al. Immunobiology. 2020, **226**, 152047.
3. Simberova S., Suk T. Image Analysis, Computer Vision, and Applications. Conf. Proc. 2013, 33–40.
4. Serov D.A, Tikhonova I.V, Safronova V.G., et al. Cell. Biol. Int. 2021, **45**, 1533–1545.

## Исследование сходимости алгоритма дифференциальной эволюции при моделировании оптического отклика фотосинтетических пигмент-белковых комплексов

Чесалин Д.Д.

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

*E-mail: [genoa-and-pittsburgh@mail.ru](mailto:genoa-and-pittsburgh@mail.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-127-129

Фотосинтетические *пигмент-белковые комплексы* (ПБК) являются неотъемлемой частью тилакоидных мембран высших растений и бактерий и обеспечивают синхронизацию первичных процессов поглощения квантов света и окислительно-восстановительных химических реакций [1]. Эти комплексы представляют большой интерес с точки зрения моделирования оптического отклика кристаллов органических молекул [2]. Теоретические исследования таких систем стали возможны с развитием современных вычислительных методов, однако некоторые особенности функционирования ПБК в качестве свето-собирающих антенн до сих пор остаются слабоизученными. Теория молекулярных экситонов и концепция многомодового броуновского осциллятора позволяют моделировать линейный и нелинейный оптический отклик любого пигмент-белкового комплекса. Мы будем применять полуклассические методы для аппроксимации экспериментальных данных. Для этого мы используем метод *дифференциальной эволюции* (ДЭ) [3, 4], относящийся к семейству оптимизационных алгоритмов. Основываясь на предыдущих исследованиях линейных оптических свойств мономерных фотосинтетических пигментов с использованием ДЭ, мы переходим к более сложным системам, таким как *реакционный центр* (РЦ) фотосистемы II, выделенной из высших растений. Такой РЦ включает в себя всего лишь 8 пигментов, поэтому он является очень удобным объектом для тестирования ДЭ. Мы исследовали зависимость сходимости алгоритма от настроек ДЭ, в конечном счете находя оптимальный режим работы процедуры оптимизации. РЦ фотосистемы II показан на рисунке 1.



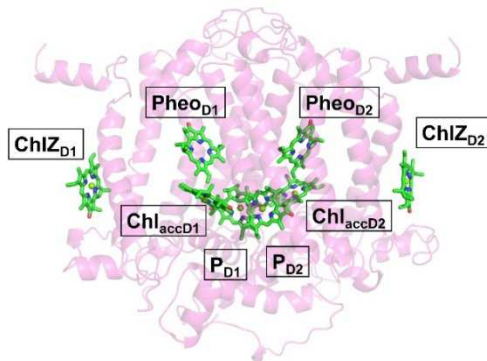


Рис. 1. Кофакторы РЦ фотосистемы II

РЦ принимает энергию поглощенных квантов света от светособирающей антенны и инициирует три последовательных этапа процессов разделения заряда. РЦ состоит из шести бактериохлорофиллов, два из которых образуют димер, в котором начинается разделение зарядов, и двух бактериофеофитинов, которые являются акцептором электронов в транспортной сети в РЦ.

Для демонстрации ДЭ как эффективного метода вместо подгонки реальных экспериментальных данных были использованы искусственно созданные спектры в качестве целевых функций. Этот прием позволяет ДЭ с высокой точностью находить набор желаемых параметров модели. Для моделирования была применена модифицированная теория Редфилда взаимодействующих пигментов и модель многомодового броуновского осциллятора. Для упрощения не учитывалось неоднородное уширение экситонных состояний.

ДЭ имеет 10 основных стратегий и два параметра настройки:  $F$  — весовой коэффициент,  $Cr$  — вероятность кроссовера. На основании предыдущих исследований, для  $F$  был выбран диапазон (0.6–0.9), а для  $Cr$  — диапазон (0.8–1.0). Параметры менялись с дискретным шагом 0.05. Значения моделировались при использовании 4 экспериментальных спектров: поглощения, флюоресценции, линейного и кругового дихроизма. Все результаты получены при 100 генерациях после 10 итераций алгоритма ДЭ. Целевая функция показывает, насколько велика разница между искусственно созданными спектрами и результатом подгонки ДЭ. Зависимость целевой функции от параметров  $F$  и  $Cr$  для стратегий *DE/rand-to-best/1/exp* (красный) и *DE/best/1/bin* (синий) показана на

рисунке 2.

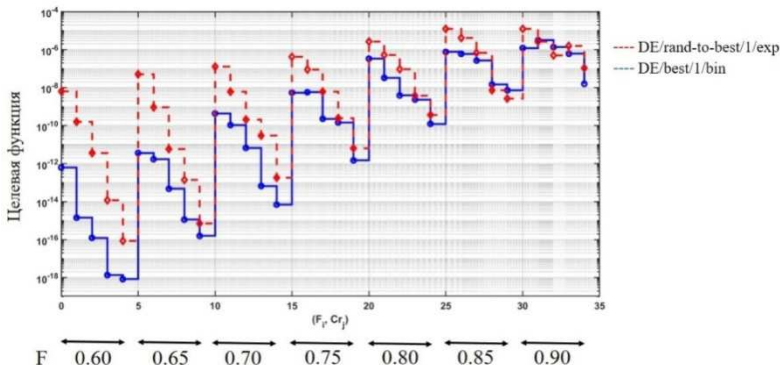


Рис. 2. Зависимость целевой функции от параметров  $F$  и  $Cr$  для обеих стратегий

Можно увидеть, что значения целевой функции для стратегии *DE/best/1/bin* лучше, чем для стратегии *DE/rand-to-best/1/exp*. Наилучший результат был достигнут для *DE/best/1/bin* при параметрах настройки  $F = 0.6$  и  $Cr = 1.0$  и оказался  $-19$  порядка, что фактически означает, что точное решение было найдено. Можно сделать вывод, что скорость сходимости для стратегии *DE/best/1/bin* значительно выше, чем для стратегии *DE/rand-to-best/1/exp*.

Были аппроксимированы экспериментальные данные для нескольких параметров с высокой точностью. Используя этот алгоритм, можно найти многие параметры фотосинтетических пигмент-белковых комплексов, характеризующих электрон-фононные взаимодействия.

Автор выражает благодарность научному руководителю, к.ф.-м.н. Пищальникову Р.Ю. за постановку научной задачи, помощь в измерениях и обсуждение результатов.

1. Mirkovic T.; Ostroumov E.E.; Anna J.M., et al. Chemical Reviews, 2017, **117**, 249–293.
2. Jang S.J., Mennucci B. Reviews of Modern Physics, 2018, **90**.
3. Pishchalnikov R.Y., Bondarenko A.A., Ashikhmin A.A. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2020, **41**, 1545–1553
4. Pishchalnikov R.Y. Journal of Computational Physics, 2018, **372**, 603–615.

## РАДИОФИЗИКА И АКУСТИКА

### Распространение звука в магнитных жидкостях вблизи температуры стеклования дисперсионной среды

**Курилов А.Д.<sup>1,2</sup>, Паращук Н.С.<sup>2</sup>, Чаусов Д.Н.<sup>1,2</sup>**

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

*2- Московский государственный областной университет, Мытищи*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-130-131

Распространение звуковых волн в малоцентрированных магнитных жидкостях в отсутствие магнитного поля подчиняется классическим теориям, основанным на механизмах дополнительной диссипации энергии вязкими и тепловыми волнами, возникающими на границах раздела фаз «частица-жидкость» [1, 2]. С ростом концентрации, а также приложением магнитного поля возникают дополнительные механизмы поглощения звука (структурный, диполь-дипольный и другие) [3]. Аналогичные явления имеют место вблизи фазовых переходов в таких системах. В частности, научный и практический интерес представляет исследование магнитных жидкостей на основе минеральных масел в области низких температур (вблизи температуры стеклования дисперсионной среды). Таким образом, в работе используется комплекс экспериментальных методов (дифференциальная сканирующая калориметрия, вискозиметрия, методы физической акустики) для изучения особенностей распространения звука в магнитных жидкостях вблизи температуры их стеклования. В качестве объекта исследования выбран широкий концентрационный ряд магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла (от 0 до 10 % объёмной доли). Все образцы синтезированы Проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики Ивановского государственного энергетического университета.

Экспериментально получены температурные зависимости скорости распространения и коэффициента поглощения звука магнитными жидкостями в области температур от 263 до 323 К на несущей частоте акустического сигнала 3.65 МГц. Полученные

зависимости представлены на Рис. 1.

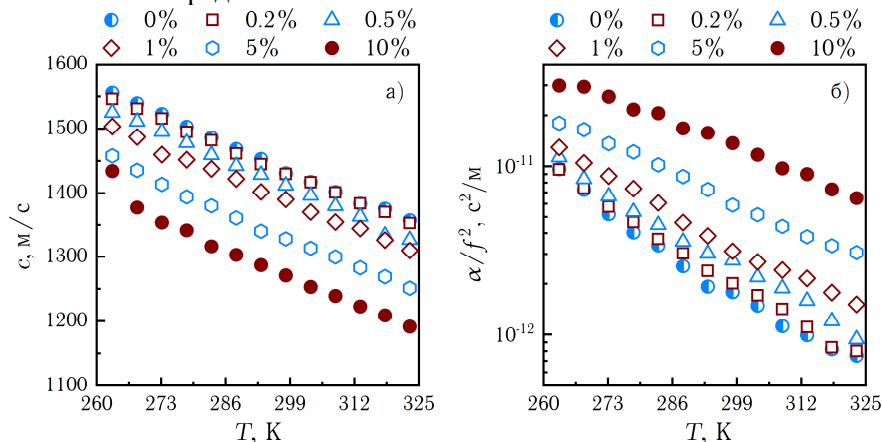


Рис. 1. Температурные зависимости скорости распространения звука а) и коэффициента его поглощения б) концентрационного ряда магнитной жидкости на основе трансформаторного масла.

Используя методы дифференциальной сканирующей калориметрии определены температуры стеклования и изменения удельной теплоёмкости. Данные, полученные с помощью ротационного вискозиметра, позволяют оценить вклад стоковского поглощения в общее поглощение ультразвука системами. Полученные результаты анализируются и обсуждаются в рамках классической модели микронеоднородной среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90032 Аспиранты.

1. Рытов С.М., Владимирский В.В., Галанин М.Д. ЖЭТФ. 1938, **8**, 614–626.
2. Исакович М.А. ЖЭТФ. 1948, **18**, 907–912.
3. Надворецкий В.В., Соколов В.В. Магн. гидродин. 1997, **33**, 30–34.

## Моделирование трёхмерной структуры звукового поля на арктическом шельфе с неоднородным дном

**Сидоров Д.Д.<sup>1,2</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: [sidorov.dan.dmit@gmail.com](mailto:sidorov.dan.dmit@gmail.com)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-132-134

В работе рассмотрено распространение низкочастотного звука в мелководной области Карского моря с неоднородным распределением скорости звука в дне и постоянной глубиной водного слоя. В таких зонах скорость звука в дне  $c_b$  может снижаться до скорости звука в воде  $c_w$ , что связано с наличием газа в осадках или их водонасыщенностью [1]. Здесь возможно проявление трёхмерных эффектов, под которыми подразумевается отклонение траекторий распространения звука от прямолинейных в горизонтальной плоскости.

Трёхмерные акустические эффекты в мелководных волноводах, в том числе горизонтальная рефракция, уже наблюдались при наличии наклона дна или неоднородностей в водной толще. Совместное влияние неровностей поверхности дна и неоднородного распределения скорости звука в дне на Атлантическом шельфе США было рассмотрено в работе [2].

Для анализа 3D-эффектов в данной работе используется подход «вертикальные моды — горизонтальные лучи» и метод модовых параболических уравнений [3]. Для вычисления акустического поля в точке  $(\vec{r}, z)$ , где  $\vec{r} = \{x, y\}$  — радиус-вектор в горизонтальной плоскости, разложим поле на совокупность нормальных волн (мод)  $M$  с номерами  $l = \overline{1, M}$ :

$$\Psi(x, y, z) = \sum_{l=1}^M P_l(\vec{r}) \psi_l(\vec{r}, z),$$

$P_l(\vec{r})$  — модовые амплитуды,  $\psi_l(\vec{r}, z)$  — собственные функции (моды).

Для изучения трёхмерных эффектов при распространении акустических волн рассмотрим мелководную область с неоднородным распределением скорости звука в дне в Карском море (рис. 1).

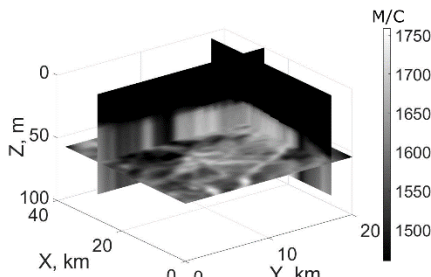


Рис. 1. Результаты скоростного анализа данных 3D-сейсморазведки для Карского моря.

На рис. 1 и 2 представлены яркостные картины, изображающие скорость звука в воде и дне. Видно, что скорость звука в некоторых областях дна равняется скорости звука в воде  $c_b \approx c_w$  (чёрные участки). Плотность дна считаем постоянной  $1800 \text{ кг/м}^3$ , т.к. взятие проб данного грунта показало, что изменение плотности незначительное. На рис. 2 изображен разрез в горизонтальной плоскости. Кружком отмечено положение источника звука с частотой излучения  $f = 137 \text{ Гц}$ .

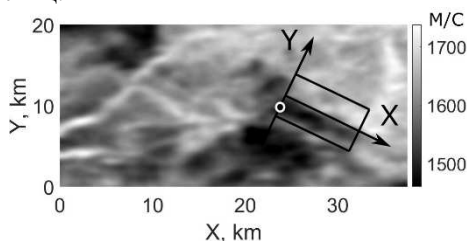


Рис. 2. Разрез дна в области Карского моря по глубине  $z = 55 \text{ м}$  и  $h = 27 \text{ м}$  от границы вода — дно.

Результаты вычисления модовых амплитуд и траекторий модовых лучей (белые линии) для первых трёх мод показаны на яркостных картинах на рис. 3. Неоднородность, расположенная перпендикулярно распространению звука и связанная с особенностями структуры поля скорости звука в дне, оказывает значительное влияние на траектории лучей и распределение

амплитуд в горизонтальной плоскости. Лучше всего видно проявление горизонтальной рефракции на рис. 3 (в) – для высшей моды. Влияние неоднородности приводит к тому, что углы горизонтальной рефракции достигают  $10^\circ$ . При этом изменение модовой амплитуды за счёт горизонтальной рефракции может достигать 4 дБ для первой моды и  $\approx 30$  дБ — для второй и третьей.

Для наблюдения горизонтальной рефракции используют вертикальные и горизонтальные антенны. Путём выделения каждой моды можно оценить влияния эффекта на результирующее поле.

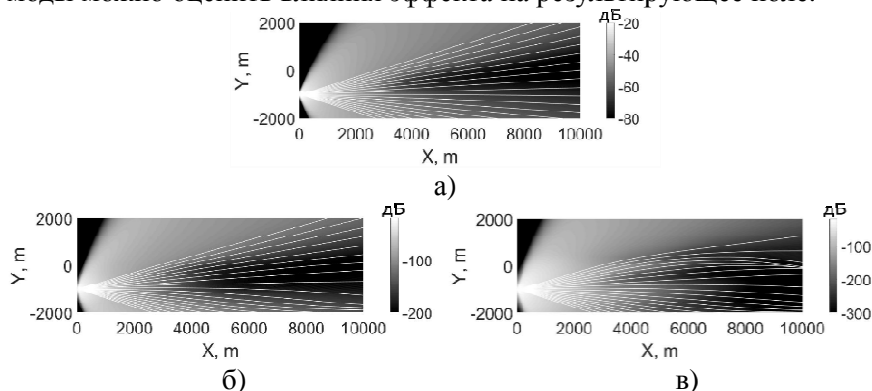


Рис. 3 Траектории модовых лучей и распределения модовых амплитуд в дБ для первой (а), второй (б) и третьей (в) моды.

Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику лаборатории гидрофизики НЦВИ ИОФ РАН Петникову В.Г., а также научному сотруднику Воронежского государственного университета Григорьеву В.А.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-02-00127.

1. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е. Акуст. журн. 2018, **64**(3), 342–358.
2. Ballard Megan S., Lin Ying-Tong, Lynch James F. J. Acoust. Soc. Am. 2012, **131**(4), 2587–2598.
3. Collins M.D., Westwood E.K. J. Acoust. Soc. Am. 1991, **89**(3), 1068–1075.

# ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

## Сравнение результатов измерения уровней сульфатов в атмосферном воздухе при использовании фильтров различных типов

Ахметова Б.Р.<sup>1,2</sup>, Александрова М.С.<sup>1</sup>

1- *Институт глобального климата и экологии  
им. академика Ю.А. Израэля, Москва*

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

E-mail: [ahmetova786@gmail.com](mailto:ahmetova786@gmail.com)

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-135-136

В России определение фоновых уровней аэрозольных сульфатов ведется на станциях трансграничного и *комплексного фонового мониторинга* (КФМ). Для отбора проб сульфатов на станциях трансграничного мониторинга используются фильтры Watman 40, на станциях КФМ фильтроткань Петрянова типа ФПП (из перхлорвиниловых волокон).

Для анализа содержания аэрозольных сульфатов в атмосферном воздухе на сети КФМ в 70-х годах XX века выбор фильтров ФПП обуславливался тем, что при стандартной пробоподготовке и фотометрическом методе анализа, результаты анализа ФПП показывали устойчивые максимальные значения содержания сульфатов. Однако с развитием технологий в международных программах стали рекомендовать применение целлюлозных фильтров и использование *ионной хроматографии* (ИХ) в качестве референсного метода химического анализа. Стандартный метод пробоподготовки с использованием соляной кислоты для извлечения сульфатов из фильтра не подходит для приготовления экстракта с целью определения содержания сульфатов методом ИХ. Для определения содержания сульфатов на фильтрах ФПП методом ИХ показал свою эффективность ультразвуковой метод пробоподготовки [1].

Целью работы являлось определение возможности использования фильтров ФПА (из ацетил целлюлозных волокон) для мониторинга содержания сульфатов в атмосферном воздухе.



Отбор проб аэрозольных сульфатов на фильтры ФПА и Watman 40 проводился на единой площадке на станции «Данки», расположенной в Приокско-Тerrasном государственном природном биосферном заповеднике. Экстракция фильтров Watman 40 проводилась по стандартной методике [2], экстракция ФПА проводилась в дионизованной воде на ультразвуковой бане (время подготовки 15 минут). На рис. 1 приведены результаты определения аэрозольных сульфатов на фильтрах ФПА и Watman 40 методом ИХ. Значения на графике представлены в пересчете на элемент.

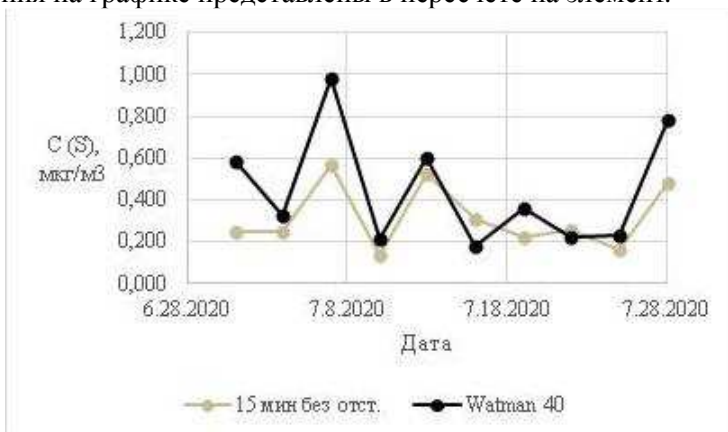


Рис. 1. Изменения содержания ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ) сульфатов в воздухе в течение июля 2020 года в пересчете на серу на фильтрах ФПА и Watman 40.

Результаты измерения лежат в одном диапазоне и демонстрируют синхронные колебания на большей части ряда. Таким образом показано, что возможно использование фильтров ФПА (из ацетил целлюлозных волокон) для мониторинга содержания сульфатов в атмосферном воздухе.

1. Колесникова Е.С., Позднякова Е.А., Конькова Е.С. и др. Экологические системы и приборы. 2020, № 10, 23–29.
2. Руководство ЕМЕП по отбору проб и химическому анализу / Пер. с англ. под ред. А.Г. Рябошапко. NILU-Norwegian Institute for Air Research, 2006, 270 с.

**О необходимости развития  
методических и методологических подходов  
при определении содержания никеля  
в атмосферном воздухе на территории РФ**

**Безденежных В.А.<sup>1,2</sup>**

*1- МИРЭА — Российский технологический университет, Москва*

*2- Институт глобального климата и экологии  
им. академика Ю.А. Израэля, Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-137-138

Эффективное создание углерод-углеродной (C–C) связи является одной из фундаментальных проблем современной препаративной органической химии. Эти связи присутствуют в подавляющем большинстве природных соединений, многочисленных фармацевтических препаратах на их основе, продуктах органического синтеза и нефтехимии.

Многие реакции, приводящие к образованию новых углерод-углеродных или углерод-гетероатомных связей, катализируются комплексами никеля (Ni). На сегодняшний день представлено множество данных об использовании каталитических систем на основе никеля для селективного создания C–C-связи, подробно описаны принципы работы каталитических систем, содержащих никель, а также показаны их ключевые характеристики.

Известно, что для крупнотоннажных промышленных производств предпочтительно использование каталитических систем, полученных путём нанесения смешанных неорганических комплексных солей из водных растворов, поскольку такие системы являются стабильными, а их использование экономически выгодно. Однако, в научной литературе не достаточно информации о влиянии Ni-содержащих каталитических систем на окружающую среду[1].

Целью работы являлась оценка наличия и полноты нормативной, в том числе методической документации по определению содержания никеля в атмосферном воздухе на территории РФ.

Существующие методические указания определения никеля [2] применимы только для анализа *предельно допустимых концентраций* (ПДК) воздуха рабочей зоны и не подходят для анализа фоновых

уровней в воздухе региона. Фоновые значения необходимы для проведения сравнения и оценки степени загрязнения промышленных объектов, в настоящее время для подобных оценок используются расчетные значения, которые в отсутствие верификации по экспериментальным данным могут обладать высокой погрешностью. В 2019 году в стратегии мониторинга 2020–2029 международной совместной программы мониторинга и оценки дальних переносов атмосферных загрязняющих веществ в Европе (ЕМЕП) никель вошел во второй приоритет веществ, подлежащих определению. В Германии с 1991 года действует методический документ, регламентирующий процедуру определения концентраций никеля в атмосферном воздухе [2].

В России отсутствуют нормативные документы и стандартизированные методики по проведению мониторинга никеля в атмосферном воздухе природных территорий. Перед экологами и химиками стоит задача разработки методической документации и методологических подходов при определении содержания никеля в атмосферном воздухе на территории РФ.

1. D. Baralkiewicz, J. Siepak. Polish Journal of Environmental Studies. 1999, 8(4), 201–208.
2. J. Angerer Examiner: K. Goßler Air Monitoring Methods, Vol. 1, 1991.
3. Сборник методических указаний МУК 4.1.3312—4.1.3321—15. Измерение концентраций вредных веществ в воздухе рабочей зоны: Сборник методических указаний. Вып. 57.—М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2016.—116 с.

## **Анализ представленных СЕИР данных изменения уровня общей эмиссии свинца**

**Иванов В.А.<sup>1,2</sup>, Позднякова Е.А.<sup>1</sup>**

*1- Институт глобального климата и экологии  
имени академика Ю. А. Израэля, Москва*

*2- МИРЭА — Российский технологический университет, Москва*

*E-mail: [Dunkelheit2015@yandex.ru](mailto:Dunkelheit2015@yandex.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-138-141

Начиная со второй половины прошлого века всё больше внимания уделяется наблюдению за состоянием атмосферы и

проблемам снижения выбросов веществ, загрязняющих воздух. В 1979 году была принята *Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (LRTAP) Европейской Экономической Комиссией ООН (ЕЭК ООН)*. Конвенция к настоящему времени ратифицирована 51 страной, включая Россию. В 2007 году решением Исполнительного органа ЕЭК ООН был учрежден *Центр кадастров и прогнозов выбросов (CEIP)*. В задачи CEIP входит: сбор и компиляция данных по выбросам, создание баз данных для моделирования и т.д. В соответствии с международными обязательствами, каждая страна-участница Конвенции должна предоставлять центру данные об общей эмиссии загрязняющих воздух веществ. Для моделирования и корректной оценки данных CEIP использует не только предоставленные данные стран-участниц, но также восполняет недостающие значения или корректирует исходные данные, используя экспертные оценки, основанные на различных принципах и моделях. Целью представленной работы является оценка данных CEIP об общей эмиссии свинца на территории РФ за период с 1990 по 2015.

Данные CEIP об общей эмиссии свинца на территории РФ за этот период представлены на рис. 1, демонстрирующем значительное снижение уровней эмиссии свинца. Обращает на себя внимание резкий перепад значений в 2003–2004 годах. Так как разница между значениями общей эмиссии в 2003 и 2004 году превышает  $3\sigma$ , то возможно рассматривать этот ряд данных как 2 отдельных ряда 1990–2003 гг. и 2004–2015 гг. [1]. Перепад может быть частично объяснен законом «О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации» вступившим в силу с 1 июля 2003 года [2]. Однако величина выбросов зависит не только от мобильных, но и от стационарных источников поступления свинца в атмосферу. Оценка вклада стационарных источников в общую эмиссию проводилась, по данным Росстата с 2000 по 2015 год представлены рис. 2. Отметим, что в течение 2004 году значимого снижения эмиссии от стационарных источников не произошло.

После исключения основного мобильного источника свинца (автотранспорт) в 2003 году, в последующие годы выбросы от стационарных источников должны составлять большую часть общей эмиссии. Это должно привести к одинаковой тенденции изменения уровней общей эмиссии (CEIP) и эмиссии от стационарных источников (Росстат). Однако в 2004 году значения Росстата превышают значения CEIP общей эмиссии на 17 т. При сравнении

показано, что для рядов данных общей эмиссии и выбросов от стационарных источников наблюдаются тенденции к снижению уровней свинца до 2009 года, далее значения Росстата продолжают снижение, в то время как общая эмиссия возрастает. Отметим, что с 2010 года выбросы от стационарных источников составляют 30 % и менее от общей эмиссии.

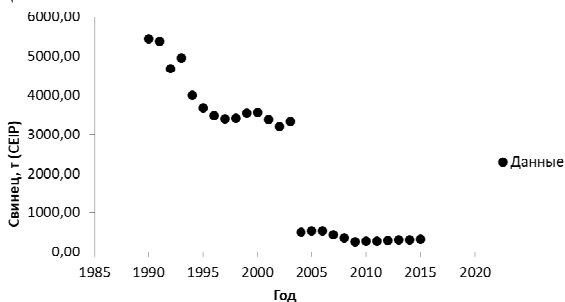


Рис. 1 Общая эмиссия свинца на территории РФ 1990–2015 гг. (СЕИР)

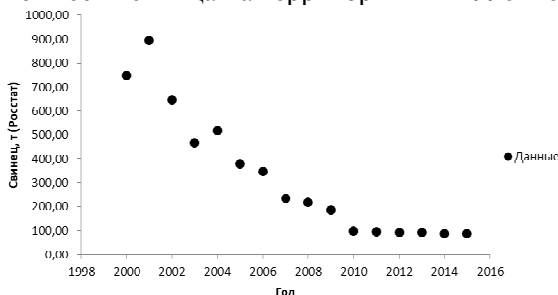


Рис. 2 Эмиссия свинца от стационарных источников на территории РФ 2000–2015 гг. (Росстат)

При подробном анализе происхождения данных было выявлено, что данные РФ в базе СЕИР представлены в виде отдельных значений для *Европейской территории России* (ЕТР) и *Азиатской территории России* (АТР). Для ЕТР значения общей эмиссии 1990–2000 и 2002–2006 гг. представляют собой официальные данные, переданные РФ, а для остальных лет — экспертные оценки. Для АТР за весь период исследования данные представлены только экспертной оценкой.

В отчете СЕИР[3] отмечается, что большинство экспертных оценок отличается от данных, переданных страной-участницей не более чем на 25 %. Для 2004 года ошибка экспертной оценки очевидно несколько выше, а начиная с 2010 г. возможно необходима

замена методики экспертной оценки. Разночтения в данных СЕИР и наблюдений в РФ могут объясняться завышенной или заниженной экспертной оценкой, а данные за 2004 год вероятно требуют пересмотра.

1. Иванов В.А., Позднякова Е.А., Громов С.А. Прикладная физика и математика. 2021, № 3, 32–39.
2. Федеральный закон от 22.03.2003 N 34-ФЗ «О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации» Собрание законодательства РФ.- 24.03.2003. — № 12. — ст. 1058.
3. Schindlbacher S., Matthews B., Ullrich B. Uncertainties and recalculations of emission inventories submitted under CLRTAP 2021. Technical report CEIP 01/2021. — 26 p.

**Анализ возможности совместного выполнения наблюдений  
на станциях международных программ  
и станциях национальной сети  
комплексного фонового мониторинга на территории РФ**

**Позднякова Е.А.**

*Институт глобального климата и экологии  
им. академика Ю.А. Израэля, Москва*

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

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-141-144

На территории России действует несколько программ мониторинга, в рамках которых ведется определение уровней содержания загрязняющих веществ на фоновых территориях, то есть территориях, неподверженных (минимально подверженных) прямому антропогенному воздействию. Наблюдения проводятся на сети комплексного фонового мониторинга (КФМ), сети мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ), на станциях международной совместной программы мониторинга и оценки дальних переносов атмосферных загрязняющих веществ в Европе (ЕМЕП), международной совместной программы комплексного мониторинга воздействий загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ), на участках международной кооперативной программы по растительности (ICP Vegetation), международной кооперативной

программы по лесам (ICP Forest). Комплексный фоновый мониторинг входит в государственную систему наблюдений РФ. Остальные программы выполняются в рамках международных обязательств РФ. Программы ЕМЕП, МСП КМ, ICP Vegetation, ICP Forest должны охватывать Европейскую часть РФ, ЕАНЕТ — Азиатскую часть РФ. На рис. 1 представлены станции Мониторинга ЕМЕП, КФМ и ЕАНЕТ.

Для фонового мониторинга состояния природной среды необходимо увеличение количества станций. Для минимизации затрат при открытии новых станций, связанных с необходимостью приобретения павильонов и аппаратуры, а также трудностей, связанных с поиском специалистов-наблюдателей на станциях, была рассмотрена возможность использования инфраструктуры международных сетей мониторинга для проведения наблюдений в рамках программы КФМ.

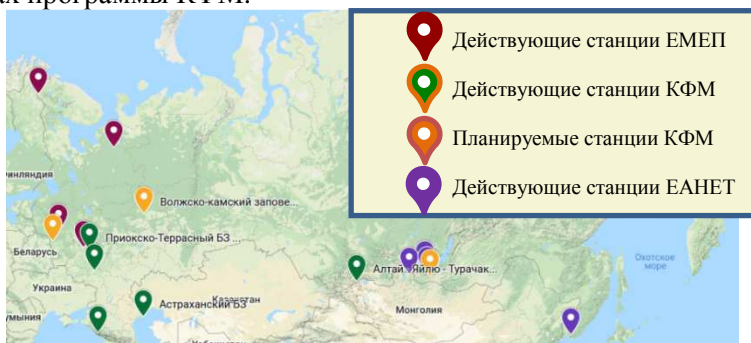


Рис. 1. Расположение станций ЕМЕП, КФМ и ЕАНЕТ.

Целью работы являлась оценка возможности создания объединенной программы наблюдения для станций, выполняющих измерения в рамках международных обязательств России и станций комплексного фонового мониторинга. Для такой оценки необходимо: рассмотреть требования к размещению станций, площадок интенсивного мониторинга, пробных площадок и виды наблюдений, параметры, подлежащие определению при проведении мониторинга, вопросы снабжения станции электроэнергией, наличие наблюдателя и т.д.

Деятельность ЕМЕП направлена на оценку состояния атмосферного воздуха. На станциях и в лабораториях определяется содержание *загрязняющих веществ* (ЗВ) и частиц в атмосферном воздухе, а также метеоданные. В программах МСП КМ и ЕАНЕТ

также основное внимание уделяется состоянию атмосферного воздуха, однако они ориентированы и на анализ экосистемного отклика [1][2]. Поэтому кроме содержания ЗВ, в рамках данных программ ведутся наблюдения за состоянием растительности и почв, и оценка состояния круговорота веществ в пределах малых водосборов. ICP Forest и ICP Vegetation ориентированы на получение информации о состоянии растительных сообществ и содержании некоторых загрязняющих веществ в воздухе и в растительности, эта информация безусловно обладает высоким уровнем значимости и позволяет верифицировать модели для территорий, где невозможно создать постоянные пункты наблюдения. В рамках ICP Forest и ICP Vegetation необходима организация частой сетки пробных площадок, однако нет требований к организации постоянных пунктов наблюдения. Поэтому исследования по программам ICP Forest и ICP Vegetation могут проводиться на участках, расположенных около станций КФМ и ЕМЕП.

Ранее в литературе отмечалось [3], что параметры размещения и организации станций ЕМЕП и КФМ сходны, что привело к созданию РД «Организация и проведение режимных наблюдений за фоновым состоянием загрязнения окружающей среды и трансграничным переносом загрязняющих веществ». Отметим, что программа МСП КМ выполняется частично как на станциях КФМ, так и на станциях ЕМЕП, это подтверждает, что ключевые характеристики размещения станций на фоновых территориях для данных программ сходны. Для станций ЕАНЕТ размещенных на фоновых территориях ключевыми характеристиками являются: репрезентативность для региона и удалённость от локальных источников загрязняющих веществ. Таким образом, на организованных станциях мониторинга возможно проведение всех вышеперечисленных программ.

При рассмотрении перечня веществ, подлежащих обязательному определению в рамках работы программ ЕМЕП, ЕАНЕТ и МСП КМ, выявлено несоответствие перечню КФМ.

Особо стоит отметить, что референтные методы определения ЗВ, рекомендуемые международными программами, отличаются по принципам, пределам обнаружения и т.д., что не позволяет проводить одно измерение на станции для всех европейских или азиатских сетей мониторинга.

Таким образом, возможно введение программы мониторинга КФМ на станциях сетей ЕМЕП и ЕАНЕТ, однако необходимы



согласование перечня измеряемых веществ, а также разработка единых методов отбора, консервации, транспорта и анализ проб.

1. Техническое руководство по проведению мониторинга почвы и растительности в Восточной Азии, Перевод с английского. — М., ФГБУ «ИГКЭ». 2021.
2. Руководство по комплексному мониторингу. Перевод с английского. — М., ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». 2013.
3. Громов С.А., Парамонов С.Г. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016, **XXVI**(1), 205–221.

**Содержание нефтепродуктов в почве  
как обязательный параметр анализа  
для обследования территорий  
при организации станций комплексного фоновый мониторинга**

**Саратовцева Е.Е.<sup>1,2</sup>, Позднякова Е.А.<sup>1</sup>**

*1- Институт глобального климата и экологии  
им. академика Ю.А. Израэля, Москва*

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

*E-mail: [erza2010@yandex.ru](mailto:erza2010@yandex.ru)*

DOI:10.24412/cl-35673-2021-1-144-146

Фоновый мониторинг ориентирован на получение информации о состоянии природной среды, минимально затронутой хозяйственной деятельностью человека. На основании этой информации проводятся оценки и прогноз изменения этого состояния под влиянием антропогенных факторов. В России наблюдения за состоянием природной среды проводятся на станциях программы *комплексного фоновый мониторинга* (КФМ), которые располагаются на *особо охраняемых природных территориях* (ООПТ). Согласно типовой программе КФМ на станциях мониторинга определяются следующие загрязняющие вещества: тяжелые металлы (свинец, кадмий, медь, ртуть), *хлорорганические пестициды* (ГХЦГ, ДДТ и др.), *полициклические ароматические углеводороды* (ПАУ) (3,4 бенз(а)пирен, 1,12-бензперилен). Для атмосферного воздуха, атмосферных осадков, поверхностных вод,

почвы и растительности, дополнительно в пробах атмосферного воздуха ведётся определение содержания соединений серы, азота и общей пыли. Научно-методическим учреждением программы проводятся работа по актуализации списков измеряемых веществ, как для проведения регулярных наблюдений, так и для обследования территории для размещения новых станций КФМ.

В настоящее время ведутся работы по актуализации программы наблюдений к 2024 году, предполагается, в том числе, увеличить количество измеряемых ПАУ. Целью данной работы являлась оценка актуальности внесения в программу предварительного обследования определения суммарного содержания нефтепродуктов в почве.

При проведении предварительного обследования территории согласно РД «Организация и проведение режимных наблюдений за фоновым состоянием загрязнения окружающей среды и трансграничным переносом загрязняющих веществ» основным критерием места организации станции является его представительность для региона исследования. Устойчивость почвы к флуктуационным колебаниям содержания загрязняющих веществ, поступающих из атмосферы и с внутрпочвенным стоком, обуславливает проведение наблюдений 1 раз в 2 года (с 2024 года ежегодно) [1] по программе КФМ, или 1 раз в 3–5 лет согласно методическим рекомендациями международных программ. Также это обуславливает необходимость тщательного выбора почвенных сочетаний типичных для региона исследования. Поэтому необходимо проводить обследования на обширных территориях для выбора площадок почвенного и растительного мониторинга. В настоящее время из-за высокого токсичного, канцерогенного и мутагенного воздействия на биоту на станциях КФМ ведётся определение следующих ПАУ: 3,4 бенз(а)пирен, 1,12-бензперилен. Увеличение списка ПАУ, подлежащих определению, также, как и проведение обследования больших территорий, с целью оценки их пригодности для размещения станций КФМ, приведет к увеличению нагрузки на аппаратуру и специалистов аналитической лаборатории научно-методического учреждения программы КФМ. Отметим, что определение ПАУ связано с некоторыми сложностями: высокая стоимость и сложность проведения анализа с использованием методов высоко эффективной жидкостной хроматографии или хромато-масс-спектрометрии. Для минимизации затрат при проведении обследования территорий возможного размещения

станции КФМ, предлагается определение массовой концентрации *нефтепродуктов* (НП) в пробах почв гравиметрическим методом [2].

В ходе работы было проведено определение концентрации нефтепродуктов НП на различных фоновых территориях. Отбор проб проводился в соответствии со стандартной методикой отбора проб КФМ. Содержание НП для ООПТ в основном составляло от 9.5 до 70.0 мг/кг почвы. Спектральный анализ образцов подтвердил, что в образцах почвы содержатся, помимо следовых количеств гуминовых кислот, синтетические органические примеси, состоящие из алифатических, карбонильных соединений (формальдегид, формалин, ацетальдегид, ацетон, сложные эфиры и др.) и диалкилсульфитов, обнаруженных в бензиновых и керосиновых фракциях нефти, которые могут составлять основную массу сульфидов. Таким образом, результаты данного анализа дают представление о содержании НП в почве на фоновых территориях. Что в совокупности с отсутствием необходимости использования специального оборудования и доступностью расходных материалов позволяет рекомендовать его к включению в программу предварительных обследований территории — кандидата на размещение станции КФМ.

Исследование выполнено в рамках темы НИОКТР АААА-А20-120020490070-3 «Развитие и модернизация методов и технологий комплексного фонового мониторинга и комплексной оценки состояния и загрязнения окружающей среды РФ и её динамики (по интегрированным результатам сетей мониторинга Росгидромета)».

1. Громов С.А., Парамонов С.Г. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016, **XXVI**(1), 205–221.
2. ПНД Ф 16.1.41-04. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293846/4293846504.pdf>

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ УЧАСТНИКОВ

Фамилия имя отчество участника	аффилиация	стр.
<b>Аблизен Р.С.</b>	ОК	<b>78</b>
<i>Азаревич А.Н.</i>	<i>ОНТиКТ</i>	34
<i>Александрова М.С.</i>	<i>РХТУ</i>	135
<b>Аникеева В.Е.</b>	ИСАН	<b>45</b>
<b>Астанина П.Н.</b>	МГУ	<b>48</b>
<b>Ахметова Б.Р.</b>	ИГКЭ	<b>135</b>
<b>Багров Д.В.</b>	МГУ	<b>51</b>
<b>Безденежных В.А.</b>	ИГКЭ	<b>137</b>
<b>Болдырев К.Н.</b>	ИСАН	<b>31, 42, 45</b>
<i>Борзосеков В.Д.</i>	<i>ОФП</i>	82, 89, 94
<b>Брагина В.А.</b>	ОСПЯ ЦЕНИ	<b>97</b>
<i>Буренин А.Г.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	97
<i>Бурко А.</i>	<i>БГУИ</i>	122
<b>Бурмистров Д.Е.</b>	Центр Биофотоники	<b>100</b>
<b>Бухарина А.Б.</b>	ОК	<b>103</b>
<i>Веремьева М.В.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	97
<i>Гирель К.</i>	<i>БГУИ</i>	122
<i>Гришин М.Я.</i>	<i>Центр Биофотоники</i>	10
<b>Грудиев Е.И.</b>	ОК	<b>79</b>
<i>Гудков С.В.</i>	<i>Центр Биофотоники</i>	22
<b>Гурьев Д.А.</b>	ОЛКиТЛ НЦЛМТ	<b>7</b>
<i>Гутенева Н.В.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	97
<i>Дежкина М.А.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	16
<i>Дубков С.В.</i>	<i>МИЭТ</i>	122
<i>Дунаева Е.Э.</i>	<i>ОЛМФ НЦЛМТ</i>	68
<i>Завацкий С.</i>	<i>БГУИ</i>	122
<b>Завозин В.А.</b>	Центр Биофотоники	<b>10</b>
<b>Заклецкий З.А.</b>	ОФП	<b>82</b>
<b>Зверев А.Д.</b>	ОЛКиТЛ НЦЛМТ	<b>13</b>
<b>Иванов В.А.</b>	ИГКЭ, МИРЭА	<b>138</b>
<b>Иванюк В.В.</b>	Центр Биофотоники	<b>106</b>
<b>Игнатенко Д.Н.</b>	Центр Биофотоники	<b>109</b>
<i>Камынин В.А.</i>	<i>ОЛКиТЛ НЦЛМТ</i>	13
<b>Качмар В.В.</b>	ОФП	<b>83</b>
<i>Козак Н.К.</i>	ОФП	82
<i>Комленок М.С.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	16
<i>Кончехов Е.М.</i>	<i>ОФП</i>	92
<i>Коплак О.В.</i>	<i>ИПХФ</i>	48
<b>Красиков К.М.</b>	ОНТиКТ	<b>34</b>

<i>Кудрявцев Д.С.</i>		<i>ИБХ РАН</i>	116
<b>Кудрявцев О.С.</b>	ОК		<b>53</b>
<b>Кузнецов С.М.</b>			<b>36</b>
<i>Кузьмин И.И.</i>		<i>ИГАХ РАН</i>	113
<b>Куличенко А.М.</b>	ОСПЯ ЦЕНИ		<b>111</b>
<b>Курилов А.Д.</b>	Центр Биофотоники		<b>130</b>
<b>Курочкицкий Н.Д.</b>	ОСПЯ ЦЕНИ		<b>16</b>
<b>Лаптинская П.К.</b>	ОК		<b>113</b>
<b>Лихов В.В.</b>	НЦВО		<b>19</b>
<i>Луньков А.А.</i>	<i>НЦВИ</i>		132
<b>Любимовский С.О.</b>	ВКИВ		<b>39</b>
<i>Маклыгина Ю.С.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>		111
<i>Малахов Д.В.</i>	<i>ОФП</i>		82
<b>Мартьянов А.К.</b>	ОК		<b>56, 63</b>
<b>Можаева В.А.</b>	ОЛФ ЦЕНИ		<b>116</b>
<b>Мошкина К.Г.</b>	ОФП		82, <b>86</b>
<b>Назарян Х.Г.</b>		МФТИ	<b>58</b>
<b>Нестеренко П.А.</b>	ОФП		<b>89</b>
<b>Новиков В.С.</b>	ОК		39, <b>119</b>
<b>Новиков Д.В.</b>		МИЭТ	122
<b>Новиков И.В.</b>	ОСПЯ ЦЕНИ		<b>61</b>
<i>Новичихин Д.О.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>		97
<b>Павлик Т.И.</b>	ОФП		<b>92</b>
<i>Павлова Е.Р.</i>		<i>МГУ</i>	51
<i>Паращук Н.С.</i>		<i>МГОУ</i>	130
<i>Пастернак Д.Г.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>		53
<i>Пеганов Е.А.</i>		<i>МИСиС</i>	25
<i>Пенто А.В.</i>	<i>ОК</i>		103
<b>Позднякова Е.А.</b>		ИГКЭ 138, <b>141</b> ,	144
<b>Посадский А.Ф.</b>			<b>76</b>
<i>Романишкин И.Д.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>		111
<i>Ромшин А.М.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>		53
<i>Рыбин М.Г.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>		16
<i>Рыбковский Д.В.</i>		<i>Сколтех</i>	61
<i>Савицкий А.И.</i>		<i>МИЭТ</i>	122
<b>Саратовцева Е.Е.</b>		ИГКЭ	<b>144</b>
<b>Седов В.С.</b>	ОСПЯ ЦЕНИ		31, 42, 56, <b>63</b>
<b>Седов Е.С.</b>		ВладГУ	<b>73</b>
<i>Седова И.Е.</i>		<i>ВладГУ</i>	73
<b>Сектаров Э.С.</b>			<b>42</b>
<b>Семиренченков А.А.</b>	ЦФП		<b>65</b>
<b>Серов Д.А.</b>	Центр Биофотоники		<b>124</b>

<b>Сидоров Д.Д.</b>	НЦВИ	<b>132</b>
<i>Симакин А.В.</i>	<i>Центр Биофотоники</i>	22
<i>Смирнов В.А.</i>	<i>Акустич Ин-т</i>	89
<b>Смирнова В.В.</b>	Центр Биофотоники	<b>22</b>
<b>Соколов А.С.</b>	ОФП	82, <b>94</b>
<i>Степахин В.Д.</i>	<i>ОФП</i>	82, 94
<i>Тарасов А.И.</i>	<i>МИЭТ</i>	122
<b>Терещенко Д.П.</b>	ОЛМФ НЦЛМТ	<b>25</b>
<i>Фаррахова Д.С.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	111
<i>Федотов П.В.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	61
<i>Хомич А.А.</i>	<i>ФИРЭ</i>	31, 63
<i>Худяков Д.В.</i>	<i>ЦФП</i>	65
<b>Цилих А.Д.</b>	ОЛМФ НЦЛМТ	<b>68</b>
<i>Чаусов Д.Н.</i>	<i>Центр Биофотоники</i>	130
<i>Черкасов В.Р.</i>	<i>ОСПЯ ЦЕНИ</i>	97
<b>Чесалин Д.Д.</b>	ОК	<b>127</b>
<b>Числов А.С.</b>	ОНТ НЦЛМТ	<b>71</b>
<b>Яблочникова М.С.</b>	ВКИВ	<b>28</b>
<i>Яковлев В.В.</i>	<i>ПМГМУ</i>	103
<i>Бородкин А.А.</i>	<i>Inst. Phot. &amp; Electr., Czech Rep.</i>	65
<i>Чертопалов С.</i>	<i>Inst. Phys., Czech Rep.</i>	65
<i>Lancok J.</i>	<i>Inst. Phys., Czech Rep.</i>	65
<i>Lyutakov O.</i>	<i>ИШХБТ, Томск</i>	65
<i>Olshtram A.</i>	<i>Univ. Chem. Techn., Czech Rep.</i>	65

---

---

## 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  
Технический редактор В.Е. Шукишин*

Свёрстано 17.09.2021

Подписано в печать 02.10.2021

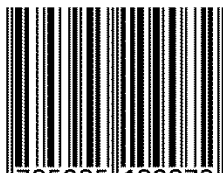
Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 4,7.

Тираж 100 экз. Заказ № ПН-2021.

Отпечатано в ООО «МДМпринт»

г. Москва, тел. +7(495) 256-10-00

ISBN 978-5-905109-07-2



9 785905 109072

ISBN 978-5-905109-07-2



9 785905 109072