



ІІТМО

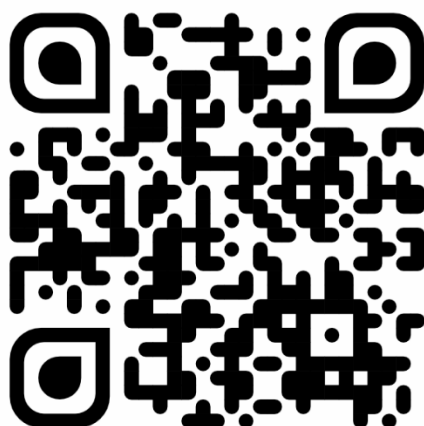
**МОЛОДЕЖНАЯ
ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«Наноструктуры.
Свойства
и применение»**

1 – 3 июля 2025

Программа и тезисы

сnpa.itmo.ru



Общая информация

Молодежная школа-конференция «Наноструктуры. Свойства и применения» для студентов, аспирантов и молодых ученых, проводится уже пятый год подряд Международным научно-образовательным центром Физики наноструктур Университета ИТМО, организатором таких международных конференции, как «Photonic Colloidal Nanostructures: Synthesis, Properties, and Applications» и «Smart nanosystems for Life».

Формат проведения – онлайн (на платформе Zoom). Регламент выступления: 10 минут на доклад и 5 минут на вопросы.

Научная программа охватывали такие тематики, как:

- Технологии роста и самоорганизация наноструктур;
- Характеризация микро- и наноструктур (зондовая и электронная микроскопия, оптическая спектроскопия, электродинамические ловушки, лазерные технологии);
- Оптические, электронные и магнитные свойства наноструктур;
- Гибридные наноструктурированные материалы и метаматериалы;
- Различные аспекты применения наноструктур и материалов на их основе.

Видео-записи докладов и мастер-классов доступны по ссылке:
https://vkvideo.ru/playlist/-36958798_5



Программный КОМИТЕТ



**Иванов Андрей
Витальевич**

Кандидат физико-математических наук,
директор МНОЦ ФН ИТМО



**Куля Сергей
Владимирович**

Кандидат физико-математических наук,
зам.ген.директора ООО «Алкор
технолоджис»



**Баранов Александр
Васильевич**

Доктор физико-математических наук,
профессор ИТМО



**Вартанян Тигран
Арменакович**

Доктор физико-математических наук,
профессор ИТМО



**Орлова Анна
Олеговна**

Доктор физико-математических наук,
профессор ИТМО



**Рождественский
Юрий Владимирович**

Доктор физико-математических наук,
профессор ИТМО



**Дададжанов Далер
Рауфович**

PhD, старший научный сотрудник
ИТМО



**Ушакова Елена
Владимировна**

Кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИТМО



**Гурвиц Егор
Андреевич**

Кандидат физико-математических наук,
ген.директор ООО «Системы
Фотоники»



**Старовойтов Антон
Андреевич**

Кандидат физико-математических наук,
доцент ИТМО



**Кунделев Евгений
Валерьевич**

Кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией ИТМО



**Щербинин Дмитрий
Павлович**

Кандидат физико-математических наук,
ассистент ИТМО



**Гладских Игорь
Аркадьевич**

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ИТМО

Организационный КОМИТЕТ

Председатель: к.ф.-м.н. Старовойтов Антон Андреевич

Секретарь: к.ф.-м.н. Кунделев Евгений Валерьевич

Члены комитета:

- к.ф.-м.н Иванов Андрей Витальевич
- к.ф.-м.н. Гладских Игорь Аркадьевич
- к.ф.-м.н. Литвин Александр Петрович
- к.х.н. Суркова Анастасия Алексеевна
- PhD Дададжанов Далер Рауфович

Расписание

1 июля (вторник)

- 11:00 – Секция 1**
13:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239108
- 14:00 – Мастер-класс**
15:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239109
- 15:00 – Секция 2**
18:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239110

2 июля (среда)

- 11:00 – Секция 3**
13:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239111
- 14:00 – Мастер-класс**
15:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239112
- 15:00 – Секция 4**
18:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239113

3 июля (четверг)

- 11:00 – Секция 5**
13:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239114
- 14:00 – Мастер-класс**
15:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239115
- 15:00 – Секция 6**
18:00 https://vkvideo.ru/video-36958798_456239116

1 июля

**11:00 – Секция 1 (председатель – к.ф.-м.н Иванов Андрей
13:00 Витальевич)**

- Приветственное слово председателя программного комитета Иванова Андрея Витальевича, к.ф.-м.н, директора МНОЦ ФН ИТМО
- **Идрисов Эдвин Гаджибалаевич, Hybrid mesoscale devices based on quantum Hall edge states (United Arab Emirates University) Приглашенный доклад**
- Анисимова Мария Матвеевна, Фомина Е.Д. Создание токопроводящих покрытий на основе нанокompозитов гидрогеля хитозана для гибких электрохимических сенсоров (РТУ МИРЭА)
- Дмитриева Екатерина Владимировна¹, Мамин Г.В.¹, Мурзаханов Ф.Ф.¹, Грачева И.Н.¹, Гафуров М.Р.¹, Солтамов В.А.² Взаимодействие удаленных ядер и спинового дефекта VB в гексагональном нитриде бора (1 - КФУ, 2 - ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН)
- Федорова Виктория Антоновна, Пудовкин М.С. Температурно-чувствительные люминесцентные сенсоры на основе наночастиц $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ (КФУ)
- Маргарян Игорь Владимирович^{1,2}, Ушакова Е.В.^{1,3} Подавление миграции ионов в перовскитных солнечных элементах углеродными наноточками (1 - ИТМО, 2 - HRBEU, 3 - CityUHK)
- Парамонов Роман Дмитриевич¹, Коломыцева А.А.¹, Ромашова А.Е.² Измерение энергетической структуры нанопластин CdSe при оптической накачке фемтосекундным лазером (1 - Гимназия №278 им. Б.Б. Голицына, 2 - ИТМО)
- Громов Николай Владимирович., Громов Н.В., Баринов М.А., Леончук С.С. Новый подход к синтезу диоксида титана и титанатов для каталитических применений с использованием сплава NaK-78 в качестве реагента (ИТМО)

1 июля

14.00 - Пленарный доклад "100 лет ультрамикроскопии. История развития, современное состояние и области применения.

15.00

*Генеральный директор ООО НП ВИЖН к.ф.-м.н., в.н.с. ИПНГ РАН
Курьяков Владимир Николаевич*

Мастер-класс "Измерение концентрации, размеров и плотности наночастиц в коллоидных растворах" *Генеральный директор ООО НП ВИЖН к.ф.-м.н., в.н.с. ИПНГ РАН Курьяков Владимир Николаевич*

**15:00 – Секция 2 (председатель – к.ф.-м.н. Гладских Игорь
17:00 Аркадьевич)**

- Носов Илья Андреевич, Головкина М.В. Характеризация наночастиц с оболочкой, способных генерировать когерентные волны (ПГУТИ)
- ~~Доненко Софья Леонидовна¹, Доненко И.Л.² Роль ионов Mg^{2+} и Ca^{2+} рапы Сасык-Сиваш (Крым) в стабилизации водонефтяных эмульсий (1 – КРСУ, 2 – КАИ)~~
- Кирюшина Екатерина Семеновна, Солдатенко С.А. Стримерный разряд как метод получения 2D структур карбида кремния (ВГТУ)
- Клименко Дарина Игоревна, Черевков С.А., Скурлов И.Д. Светоизлучающие устройства ближнего инфракрасного диапазона на основе оптимизированных неорганическим перовскитом полупроводниковых нанопластин PbSe/PbS (ИТМО)
- Седегова Татьяна Юрьевна, Клинков В.А. Полимерная композитная плёнка с галогенидными перовскитами для солнечных элементов (СПБПУ)
- Яшарова Елизавета Владимировна^{1,2}, Гангало А. Н.^{1,3} Исследование влияния самоорганизации наноструктурной меди в процессе обработки гидроэкструзией на механические свойства (1 - ДонФТИ им. А.А. Галкина, 2 - ДонГУ, 3 - ИФГП)
- Умарова Амина Шамиловна¹, Лукьяненко А.В.² Влияние температуры на рост и морфологию золотых наночастиц, полученных методом Боровской-Туркевича-Френса (1 - СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, 2 - ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН)
- ~~Банда Деррик¹, Жежерин М.О.², Полушин А.А.¹, Бузько В.Ю.^{1,2} Ростостимулирующая активность нанокомпозитных неорганических материалов по отношению к гороху (1 – КубГАУ, 2 – КубГУ)~~
- Курицкий Михаил Сергеевич, Цибульникова А.В., Лятун И.И., Зюбин А.Ю., Кострина А.А., Самусев И.Г. Нанопористая поверхность TiO/TiO_2 с плазмонной генерацией для усиления сигнала комбинационного рассеяния света (БФУ имени И. Канта)

2 июля

11:00 – Секция 3 (председатель – к.ф.-м.н. Старовойтов

13:00 Антон Андреевич)

- **Shen Mengchong, Rectangular surface nanoscale axial photonic device in a silica capillary for sensing application (Wuhan University of Technology). Приглашенный доклад.**
- Фомина Екатерина Дмитриевна, Лимаренко В.И. Создание токопроводящих и магнитовосприимчивых гидрогелевых нанокомпозитов на основе поливинилового спирта и желатина (РТУ МИРЭА)
- Писарева Екатерина Игоревна^{1,2}, Мрачковская Д.А.^{1,2} Курьяков В.Н.¹. Метод ультрамикроскопии для определения численной концентрации, размера и плотности наночастиц (1 - ИПНГ РАН, 2 - РХТУ им. Д.И. Менделеева)
- Золототрубова Анна Александровна, Королёва М.Ю. Обратные эмульсии пикеринга, стабилизированные наночастицами оксида цинка с покрытиями из каприлилметикона и циклопентосилоксана (РХТУ им. Д.И. Менделеева)
- Мармура Анна Вадимовна, Гончарова Н.И., Белозёрова Е.В., Королёва М.Ю. Высвобождение импрегнированных наноэмульсий на основе растительных масел из альгинатной матрицы (РХТУ им. Д.И. Менделеева)
- Абдуллина Анфиса Ринатовна.¹, Гунбина Е.В.², Егорова А.О.³, Чистилина А.А.⁴, Суркова А.А.⁵ Влияние размера квантовых точек на электрический отклик гибридного газового сенсора rGO/нанокристалл (1 - Гимназия №406, 2 - Аничков лицей, 3 - ГФМЛ 30, 4 - Лицей №69, г. Краснодар, 5 - ИТМО)
- Морина Анна Игоревна¹, Булаич М.Г.¹, Бакин Ф.К.¹, Захаров В.В.², Ковова М.С.² Нанокомпозит на основе пористой мембраны и люминесцирующих наночастиц для детектирования ЛОС (1 - Лицей № 150, 2 - ИТМО)
- **Круглый стол по вопросам поступления на образовательные программы Международного научно-образовательного центра Физики наноструктур (ведущий – Старовойтов Антон Андреевич, представитель приемной комиссии ИТМО).**

2 июля

**14:00 – Мастер-класс "Синтез нанокристаллов с кристаллической
15:00 решеткой перовскит различного химического состава"**
МНОЦ ФН ИТМО, аспирант Тимкина Юлия Александровна

**15:00 – Секция 4 (председатель – к.х.н. Суркова Анастасия
17:00 Алексеевна)**

- Жуков Михаил Валерьевич, Применение атомно-силовой микроскопии при исследовании и формировании биомиметических структур (ИАП РАН)
- Малкин Алексей Борисович, Политова Г. А. Моделирование магнитных свойств интерметаллидов с помощью программного пакета *mtm3* (ИМЕТ РАН)
- Ага-Тагиева Саяра, Кладько Д.В. Нанокompозиты с $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{BaTiO}_3$: синергия магнитострикции и пьезоэлектричества для мультифункциональных применений (ИТМО)
- Филиппов Дионис Демокритович, Рехман З.А., Серов А.М., Татов А.В., Голик Д.Б., Нагдалян А.А. Исследование морфологии поверхности наноразмерного диоксида титана, стабилизированного метилцеллюлозой (СКФУ)
- ~~Ляшук Виктория Константиновна, Громов Н.В., Разуванова П.В., Ага-Тагиева Саяра, Фальчевская А.С. Трансдермальная доставка лекарств с применением жидких металлов для улучшенной теплопередачи (ИТМО)~~
- Банков Александр Александрович¹, Жуков М.В.² Анализ морфологических и механических изменений бактерий под действием угнетающих факторов с помощью алгоритмизации данных с атомно-силовой микроскопии (1 - ИТМО, 2 - ИАП РАН)
- Гладышева Виктория Сергеевна, Воробьев В.Л., Быстров С.Г., Быков П.В., Баянкин В.Я. Особенности формирования морфологии и структурно-фазового состава поверхностных слоев системы Ti-6Al-4V в зависимости от температуры ионно-плазменного азотирования (УдмФИЦ УрО РАН)
- Ахундзянова Александра Олеговна, Павлова А.А., Малеева К.А., Смирнов Е.А. Оптимизация свойств усиливающих подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния с применением в экологии (ИТМО)

3 июля

**11:00 – Секция 5 (председатель – к.ф.-м.н. Литвин Александр
13:00 Петрович)**

- Кострина Алена Андреевна¹, Цибульникова А.В.¹, Землякова Е.С.^{1,2}, Лятун И.И.¹, Самусев И.Г.¹ Лазерно-модифицированная поверхность анодированного титана с островковой пленкой золота для плазмонного усиления люминесценции органических сред (1 - БФУ имени И. Канта, 2 - КГТУ)
- Фумина Алина Евгеньевна^{1,2}, Белянов И.А.¹, Спешилова А.Б.¹, Ендиярова Е.В.¹, Осипов А.А.^{1,2,3} Оптимизация процесса коллоидной сборки: одномерный байесовский подход (1 - СПбПУ, 2 - СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, 3 - ИМ УрО РАН)
- Бутманов Данил Денисович, Прудникова М.Ю., Савчук Т.П., Дронова Д.А., Назаркина Ю.В., Дронов А.А. Разработка и применение наноструктур анодных оксидов вентильных металлов в сенсорике (МИЭТ)
- Мораева Милена Викторовна, Евдокименко А.Ю., Сахабеев Р.Г. Синтез и изучение полимерной-белковых комплексов для разработки вирус-связывающих систем. (СПбГТИ(ТУ))
- Ахметова Дарья Рамилевна^{1,2}, Тищенко Ю.А.², Тимин А.С.², Шипиловских С.А.¹ Разработка платформы на основе металлоорганических каркасов для доставки терапевтического изотопа радий-223 (1 - ИТМО, 2 - СПбПУ)
- Комник Валерия Вячеславовна, Чиликина А.Ю., Лящук В.К., Кладько Д.В. Синтез и функционализация магнитных наночастиц для применения в биокаталитических системах (ИТМО)
- Русакова Владислава Александровна¹, Ахметова Д.Р.^{1,2}, Тимин А.С.¹, Шипиловских С.А.^{1,2} Разработка системы доставки на основе микро- и наноразмерных металлоорганических каркасов с контролируемым высвобождением доксорубина (1 - СПбПУ, 2 - ИТМО)
- Лашина Виктория Дмитриевна¹, Король А. А.¹, Жежерин М.О.², Бузько В.Ю.^{1,2}, Подушин Ю.В.¹, Сухно И.В.¹ Изучение влияния неорганических наносоединений на ростостимулирующую активность пшеницы (1 - КубГАУ, 2 - КубГУ)
- Лобанова Наталья Романовна, Ефремов Ю.М., Костюк С.В., Котова С.Л., Тимашев П.С. Термомеханическая характеристика микрогелей на основе поли-N-изопропилакриламида методом атомно-силовой микроскопии (Первый МГМУ им. И. М. Сеченова)

3 июля

- 14:00 – Мастер-класс "Получение тонких покрытий
15:00 анодированного алюминия для устройств фотоники"**
МНОЦ ФН ИТМО, аспирант Никитин Игорь Юрьевич
- 15:00 – Секция 6 (председатель – PhD Дададжанов Далер
17:00 Рауфович)**

- Qayyum Abdul, Post-quantum cryptographic applications in nano-iot systems (ИТМО)
- Паис Переда Хосе Хавьер, Сорокин П.Б. Теоретическое исследование механических свойств ряда композитов на основе алюминия (МИСИС)
- Ярчук Андрей Сергеевич, Обзор современных технологий применения наноструктур в "умных" текстилях (БФУ имени И. Канта)
- Лыжина Елизавета Александровна, Соловьева Е.О., Ковова М.С., Старовойтов А.А. Оптические свойства полимерных микрочастиц, допированных люминесцирующими нанокристаллами (ИТМО)
- Матвеева Елизавета Дмитриевна¹, Поздняков С.В.^{2,3}, Макаров С.В.^{2,3}, Санджиева М.А.² Одноэтапный метод синтеза стабильных металлогалогенных перовскит-МОК композитных пленок с катионом формадиния и бутиламмония. (1 - СПбПУ, 2 - ИТМО, 3 - HRBEU)
- Буев Илья Дмитриевич¹, Мурзич С.К.², Андреев А.А.³, Мифтахов А.Р.⁴, Никитин И.Ю.⁵ Получение нанопористых плазмонных электродов для увеличения эффективности солнечных батарей и люминесцентных сенсоров (1 - СОШ №511, 2 - СОШ №345, 3 - Губернаторский многопрофильный лицей-интернат для одарённых детей Оренбуржья, 4 - СОШ №75, 5 - ИТМО)
- Бриль Илья Игоревич^{1,2}, Воронин А.С.^{1,2} Получение тонких проводящих покрытий на пористой подложке (1 - ФИЦ КНЦ СО РАН, 2 - МГТУ им. Н.Э. Баумана)
- Оловяников Григорий Александрович, Фомина П.А., Булыгин Е.А., Попов И.А., Грицаева А.В., Козлов В.А. Композиты на основе поликапролактона с интегрированными неорганическими наночастицами (ИОФ РАН)
- Соболева Елизавета Викторовна, Рудый С.С., Иванов А.В. Определение управляющего параметра оптомеханической системы с бистабильной динамикой на основе гибридной ловушки (ИТМО)
- ~~Большаков Илья Николаевич. Модернизация панелей фюзеляжа самолета МС 21 с использованием углепластика и углеродных нанотрубок (УлГТУ)~~

ТЕЗИСЫ КОНФЕРЕНЦИИ

СОЗДАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТОВ ГИДРОГЕЛЯ ХИТОЗАНА ДЛЯ ГИБКИХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

Анисимова М.М., Фомина Е.Д.

Научный руководитель – к.х.н., доцент Гервальд А.Ю.

МИРЭА – Российский технологический университет

mria130403@gmail.com

В настоящее время наблюдается существенный прогресс в области гибкой электроники. В частности, одним из наиболее перспективных направлений исследований стало использование гидрогелевых нанокомпозиов в качестве материалов для гибких носимых устройств, а именно – устройств локальной доставки ферментов и неинвазивного определения содержания метаболитов и глюкозы в поте по методу ионофореза [1]. Данная работа посвящена получению и исследованию свойств нанокомпозиового токопроводящего гидрогелевого материала на основе хитозана.

Гомополимерный гидрогель хитозана получали по механизму химического сшивания, в качестве сшивающего агента использовали глутаровый альдегид (см. Рис. 1). Процесс сшивки проводили при 45°C в среде 0,1 М уксусной кислоты [2].

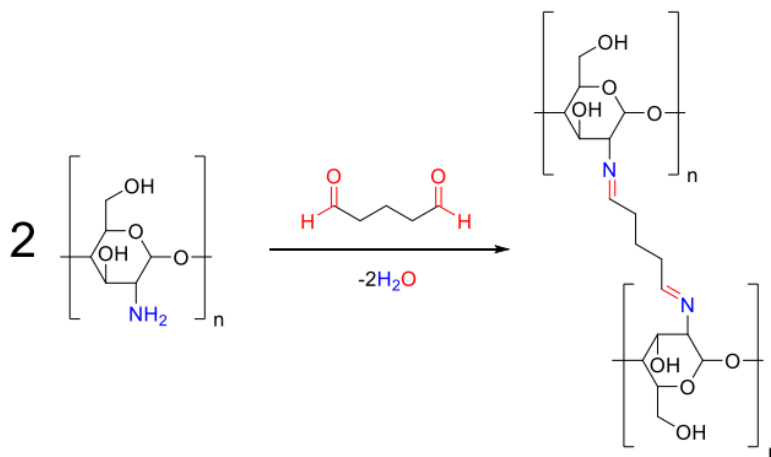


Рисунок 1 – Реакция синтеза гидрогеля хитозана

Получение нанокомпозиов проводили *in situ*: после протекания реакции сшивки в реакционную среду количественно вносили навеску одностенных углеродных нанотрубок (УНТ, $d=2\div5$ нм, $l=0,005\div0,02$ мм). Полученную дисперсию помещали в заливочную форму и оставляли до полного высыхания. В результате получали гидрогелевый нанокомпозит с содержанием УНТ 3,5 % масс.

Для образцов полученного нанокомпозита определяли показатели набухания и влагоудерживания. Установлено, что полученный материал способен набухать в дистиллированной воде с увеличением массы в 3,8 раза (в 4,5 с учетом присутствия в структуре УНТ, не склонных к набуханию). Высокое значение степени набухания объясняется действием электростатического отталкивания, возникающего между частицами УНТ, который приводит к расширению пор внутри полимерной матрицы, что способствует диффузии воды в материал. Коэффициент удержания воды равен 17,7%, а полного высыхания образцы достигали через 3,5 часа нахождения на воздухе при комнатной температуре.

В результате определения упруго-прочностных свойств полученного нанокомпозита путем растяжения пленкообразных образцов до разрыва установили значения максимальной нагрузки, равное 31,8 Н, при относительном остаточном удлинении 1045%. Модуль Юнга равен 0,3 МПа. Значения данных показателей свидетельствуют о действии УНТ как армирующей добавки.

Определение проводимости полученного нанокompозита проводили с использованием метода вольтамперометрического анализа. Материал наносили в качестве покрытия на печатный электрод. Вольтамперограмма полученного электрода представлена на Рис. 2.

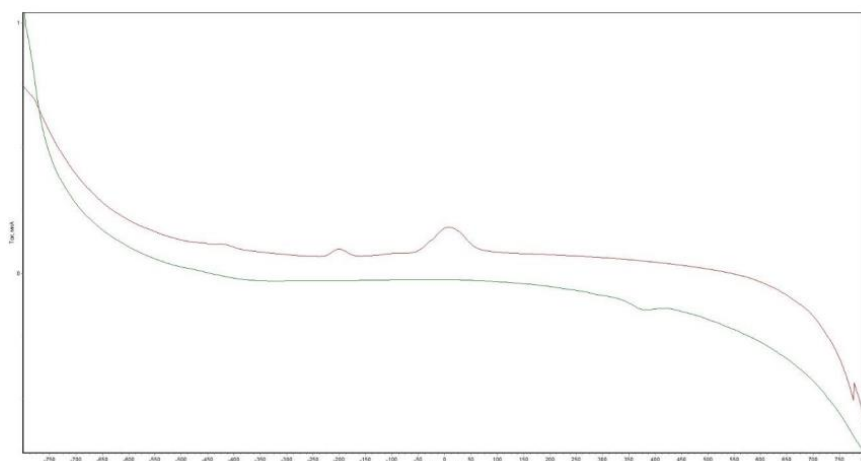


Рисунок 2 – Циклическая постоянноточковая вольтамперограмма электрода с покрытием

Процесс высвобождения фермента из полученного нанокompозита моделировали путем определения кинетики высвобождения окрашенного агента родамина Б в дистиллированную воду. Кинетика изменения оптической плотности среды-акцептора представлена на Рис. 3.

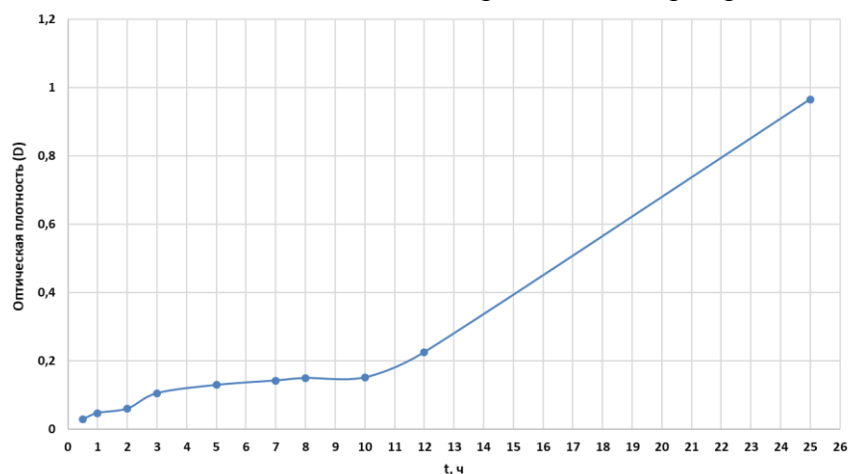


Рисунок 3 – Зависимость показателя оптической плотности раствора (D) от времени нахождения гидрогелевого материала в воде

Полученный в рамках данной работы нанокompозитный гидрогелевый материал демонстрирует перспективные свойства для применения в качестве покрытий электрохимических сенсоров в приборах определения содержания метаболитов и глюкозы в поте человека методом ионофореза.

1. Hu L., Chee P.L., Sugiarto S., Yu Y., Shi C., Yan R., Yao Z., Shi X., Zhi J., Kai D., Yu H., Huang W. Hydrogel-Based Flexible Electronics // Advanced Materials. – 2023. – V. 35. – Iss. 14;
2. Mirzaei B. E., Ramazani A. S. A., Shafiee M., Danaei M. Studies on Glutaraldehyde Crosslinked Chitosan Hydrogel Properties for Drug Delivery Systems // International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials. – 2013. – V. 62. – Iss. 11. – P. 605-611

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАЛЕННЫХ ЯДЕР И СПИНОВОГО ДЕФЕКТА V_B В ГЕКСАГОНАЛЬНОМ НИТРИДЕ БОРА

**Дмитриева Е.В.¹, Мамин Г.В.¹, Мурзаханов Ф.Ф.¹, И.Н. Грачева¹, М.Р. Гафуров¹,
В.А. Солтамов²**

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Мамин Г.В.

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
dev600@mail.ru

В настоящее время активно развивается направление, связанное с изучением и применением спиновых дефектов в кристаллах. Перспективными объектами для квантовых технологий выступают двумерные материалы, в частности гексагональный нитрид бора (hBN), которые сочетают в себе высокую термическую стабильность и возможность интеграции в гетероструктуры. Особый интерес представляет вакансия бора в hBN, которая демонстрирует уникальное сочетание спиновых, оптических и когерентных свойств. Данная система является перспективной платформой для квантовой сенсорики, так как обладает высокой чувствительностью к внешним магнитным полям и температурным изменениям [1–3].

Важным преимуществом вакансионных центров в hBN является возможность оптической инициализации, манипулирования и считывания спиновых состояний при комнатной температуре посредством оптического, микроволнового и радиочастотного возбуждения. В отличие от широко изучаемых кристаллов, таких как алмаз и карбид кремния, hBN обладает высокой концентрацией естественных изотопов с ненулевыми ядерными спинами. Электрон-ядерные взаимодействия позволяют использовать ядерные спины как элементы квантовой памяти, поскольку их когерентность сохраняется значительно дольше, чем у электронных спинов [4–5].

Для создания стабильных вакансий бора образцы hBN были подвержены электронному облучению (2 МэВ). Исследования проводились методом импульсного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на спектрометре Bruker Elexsys E680 в W-диапазоне (94 ГГц) при температуре 25 К. Для анализа электрон-ядерных взаимодействий использовалась методика двойного электрон-ядерного резонанса (ДЭЯР).

Таким образом, были установлены ключевые параметры спинового дефекта: расщепление в нулевом магнитном поле $D = 3550$ МГц (126.8 мТл) и g -фактор $= 2.004$. Для ядер ^{11}B в первой координационной сфере (см. Рис. 1), состоящей из 6 атомов бора, определены компоненты тензора сверхтонкого взаимодействия $A_{xx} = -3.80$ МГц и константа квадрупольной связи $C_q = 2.7$ МГц.

Гибридные квантовые системы, в которых электронные спины обеспечивают высокоскоростные операции и эффективное считывание, а ядерные спины служат для долговременного хранения квантовой информации, представляют собой перспективную платформу для реализации масштабируемых квантовых вычислений и коммуникаций. Ядерные спины выступают в роли уникального инструмента, обладающего длительными временами когерентности, что критически важно для создания надежных элементов квантовой памяти. Полученные данные о сверхтонком и квадрупольном взаимодействиях позволяют разрабатывать эффективные протоколы квантовых операций, включая точное управление спиновыми состояниями с помощью радиочастотных и микроволновых импульсов, а также реализацию многочастичных квантовых вентилей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-12-00151.

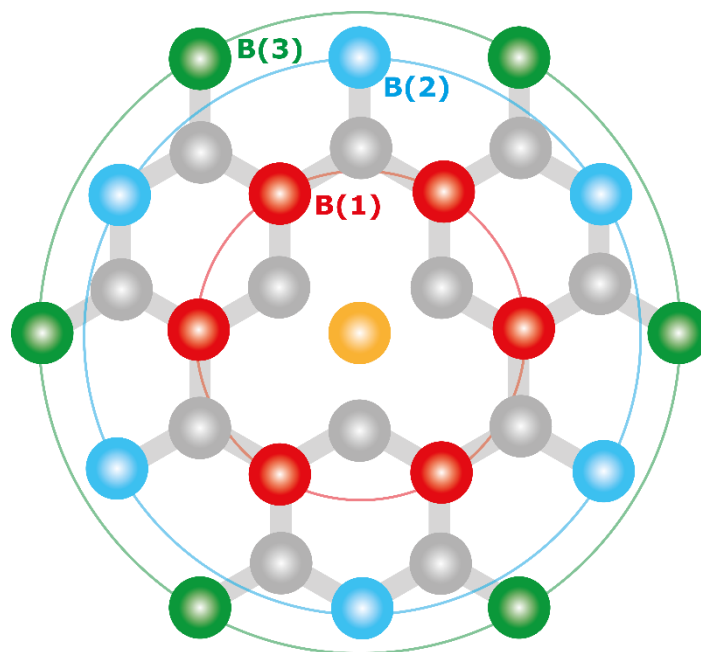


Рисунок 1 – Координационные сферы атомов бора B(1), B(2), B(3) в hBN. Желтым цветом показана вакансия бора, серым – атомы азота.

- 1 Clua-Provost T. et al. Spin-dependent photodynamics of boron-vacancy centers in hexagonal boron nitride //Physical Review B. – 2024. – V. 110. – P. 014104.
- 2 Whitefield B. et al. Magnetic Field Sensitivity Optimization of Negatively Charged Boron Vacancy Defects in hBN //Advanced Quantum Technologies. – 2025. – V. 8. – P. 2300118.
- 3 Vaidya S. et al. Quantum sensing and imaging with spin defects in hexagonal boron nitride //Advances in Physics: X. – 2023. – V. 8. – P. 2206049.
- 4 Gottscholl A. et al. Initialization and read-out of intrinsic spin defects in a van der Waals crystal at room temperature //Nature materials. – 2020. – V. 19. – P. 540-545.
- 5 Marcks J. C. et al. Nuclear spin engineering for quantum information science //Journal of Materials Research. – 2025. – P. 1-16.

ТЕМПЕРАТУРНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$

Федорова В.А.

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, доцент Пудовкин М.С.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ylter@mail.ru

Современные задачи бесконтактного измерения температуры в микро- и наноразмерных системах требуют разработки сенсоров с высокой чувствительностью, стабильностью и минимальными размерами. Оптические методы, в частности люминесцентная термометрия, являются перспективной альтернативой традиционным контактным подходам, особенно в условиях агрессивных или труднодоступных сред — от биологических тканей до космических аппаратов [1, 2]. Однако стандартные системы на основе одиночных ионов, таких как Er^{3+} , Dy^{3+} , часто демонстрируют ограниченную температурную чувствительность и недостаточную яркость сигнала [3, 4]. Для преодоления этих ограничений необходим поиск новых, многокомпонентных сенсорных материалов, способных использовать каскадные механизмы переноса энергии с выраженной температурной зависимостью.

В данной работе предложено и реализовано решение этой проблемы на основе наночастиц $\text{Ce}_{0.5}\text{Y}_{0.44-x}\text{Tb}_{0.06}\text{Eu}_x\text{F}_3$, полученных методом со-осаждения. Материалы содержат три редкоземельных иона — Ce^{3+} , Tb^{3+} и Eu^{3+} — между которыми происходит каскадный энергетический перенос: от Ce^{3+} ($5d-4f$ переход, возбуждаемый лазером на 266 нм), далее к Tb^{3+} ($^5\text{D}_4 \rightarrow ^7\text{F}_j$, 541 нм), и наконец к Eu^{3+} ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_j$, 692 нм) [5, 6]. При этом ключевым фактором температурной зависимости становится участие фононов кристаллической решетки, которые активируют температурно-зависимый перенос энергии между Tb^{3+} и Eu^{3+} . Проведённое спектрально-кинетическое исследование в диапазоне температур 80–320 К показало, что эффективность передачи энергии и относительные интенсивности $\text{Ce}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ и $\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ зависят от температуры и от концентрации Eu^{3+} (см. рис. 1).

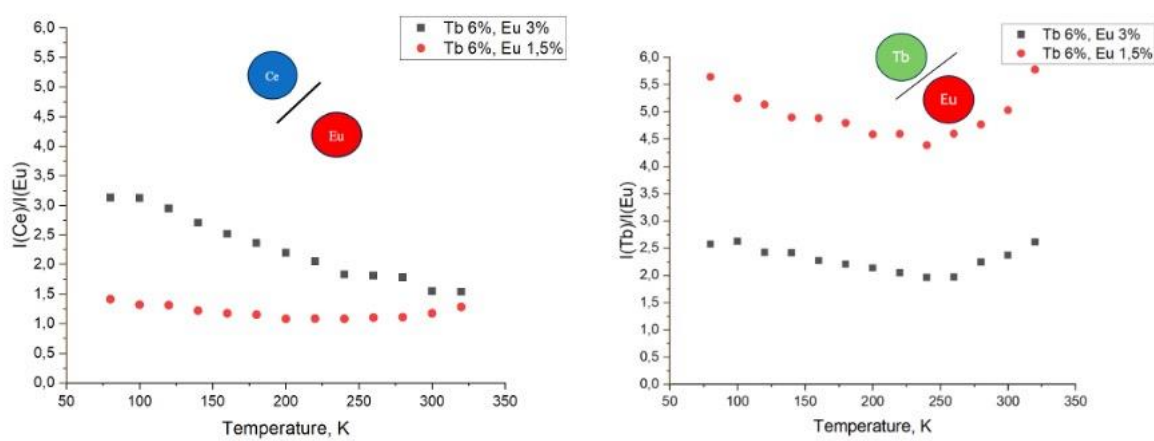


Рис. 1. Температурные зависимости интегральных интенсивностей $\text{Ce}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ (слева) и $\text{Tb}^{3+}/\text{Eu}^{3+}$ (справа)

Результаты анализа люминесценции и времени жизни показали, что наилучшая температурная чувствительность достигается при концентрации Eu^{3+} 3 молярных %. В этом случае максимальное значение абсолютной температурной чувствительности $S_a(\text{Ce}/\text{Eu})$ достигает $0,49 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$, что вдвое превышает чувствительность аналогичной пары $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$. При этом кинетика люминесценции Tb^{3+} укорачивается с ростом температуры, подтверждая эффективность энергетического переноса к Eu^{3+} . Анализ времён жизни и расчёт

эффективности переноса энергии показали увеличение на 11% при повышении температуры с 80 до 320 К, что, связано с участием фононов, облегчающих перенос энергии между уровнями ионов. Отдельный интерес представляет наблюдаемый обратный перенос энергии от Eu^{3+} к Tb^{3+} при температурах выше 240 К, что проявляется в изменении LIR и требует дальнейшего теоретического анализа.

Фазовый анализ показал, что полученные наночастицы сохраняют гексагональную структуру CeF_3 при варьировании концентрации Eu^{3+} , а средний размер частиц, определённый по данным ПЭМ, составил 14,5 нм.

Таким образом, система $\text{Ce}^{3+}\text{--Tb}^{3+}\text{--Eu}^{3+}$ в нанокристаллической матрице фторида демонстрирует перспективные свойства для создания новых температурных сенсоров, работающих в широком диапазоне температур и с высокой чувствительностью. Оптимальный состав (Tb^{3+} 6%, Eu^{3+} 3%) обеспечивает баланс между спектральной яркостью, температурной чувствительностью и стабильностью сигнала. Предложенное решение представляет собой шаг в направлении создания компактных, экономичных и универсальных люминесцентных сенсоров, применимых как в нанофотонике, так и в аэрокосмических системах контроля температуры.

- 1 Brites C. D. S. et al. Thermometry at the nanoscale //Nanoscale. – 2012. – V. 4. – №. 16. – P. 4799-4829.
- 2 Jaque D., Vetrone F. Luminescence nanothermometry //Nanoscale. – 2012. – V. 4. – №. 15. – P. 4301-4326.
- 3 Čulubrk S. et al. Non-contact thermometry with Dy^{3+} doped $\text{Gd}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ nano-powders //Journal of Luminescence. – 2016. – V. 170. – P. 395-400.
- 4 Baral S. Fundamental Studies of Photothermal Properties of a Nanosystem and the Surrounding Medium Using Er^{3+} Photoluminescence Nanothermometry. – Ohio University, 2017.
- 5 Chi F. et al. Luminescence properties of multicolor emitting La_4GeO_8 : Tb^{3+} , Eu^{3+} phosphors //Ceramics International. – 2023. – V. 49. – №. 2. – P. 2522-2530.
- 6 Duan C. et al. Preparation, characterization, and photoluminescence properties of Tb^{3+} -, Ce^{3+} -, and $\text{Ce}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$ -activated $\text{RE}_2\text{Si}_4\text{N}_6\text{C}$ (RE= Lu, Y, and Gd) phosphors //Chemistry of Materials. – 2011. – V. 23. – №. 7. – P. 1851-1861.

ПОДАВЛЕНИЕ МИГРАЦИИ ИОНОВ В ПЕРОВСКИТНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТОЧКАМИ

Маргарян И.В.^{1,2}, Ушакова Е.В.^{1,3}

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Ушакова Е.В.

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, P. R. China

³ Department of Materials Science and Engineering, and Centre for Functional Photonics (CFP), City University of Hong Kong, Hong Kong SAR 999077, P.R. China

igormargaryan@niuitmo.ru

Несмотря на значительный прогресс в эффективности преобразования солнечной энергии перовскитных солнечных элементов (ПСЭ) на основе галогенида свинца их низкая эксплуатационная надежность все еще остается препятствием на пути к их широкомасштабной коммерциализации. Одним из основных причин недостаточной стабильности перовскитного слоя и всего устройства является миграция анионов особенно при высокой температуре и влажности. Накопление ионов на контактах с транспортными слоями приводит к образованию поля, противоположного внутреннему полю, что препятствует потоку фотогенерированных носителей заряда, и способствует появлению гистерезиса тока. Предполагается, что отрицательно заряженные углеродные наноточки (УНТ) с алифатическими, карбонильными и гидроксильными группами на поверхности, за счет образования координационных и водородных связей подавляют миграцию ионов и повышают эффективность и стабильность устройств. В данной работе было использовано два вида УНТ: амфифильные CDA и амфифильных ПЕГ-илированных CDap, которые в оптимально подобранных концентрациях были добавлены в раствор перовскита [1]. При этом, согласно инфракрасной Фурье спектроскопии, ПЕГ-илирование обеспечивало увеличение количества -ОН и С-О функциональных групп на поверхности УНТ.

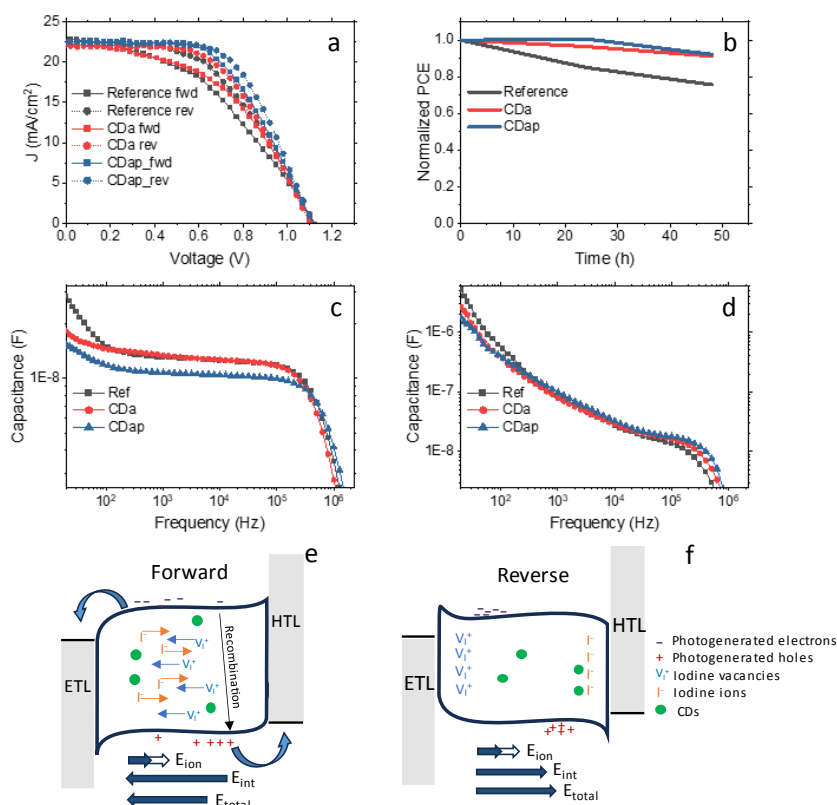


Рисунок 1 – (a) ВАХ, (b) измерение стабильности устройств, (c) темновые C-f и (d) C-f при освещении. (e, f) Схемы структуры энергетических уровней, иллюстрирующие движение фотогенерированных электронов (–) и дырок (+), распределение ионов йода (I–) и

соответствующих вакансий (V_{I+}), направления электрического поля, создаваемого мигрирующими ионами (E_{ion}), встроенного потенциала (E_{int}) и полного электрического поля (E_{total}) в ПСЭ, работающего при прямом(е) и обратном(f) сканировании. Пунктирной стрелкой показано изменение E_{ion} при добавлении амфифильных CD.

Предполагается, что ПЕГ-илирование обеспечивает более эффективную пассивацию границ зерен, которые являются основными путями миграции ионов, и взаимодействие за счет водородной связи между УНТ и ионами Γ , что привело к уменьшению гистерезиса тока с $HF=0.13$ для контрольного образца и до $HF=0.11$ и $HF=0.07$ для $CDa@FACsPbI_3$ и $CDap@FACsPbI_3$, соответственно. Максимальная эффективность устройств составила 11.6% для контрольного устройства, 12.7% для $CDa@FACsPbI_3$ и 15.0% для $CDap@FACsPbI_3$ [2].

Измерение зависимости емкости от частоты в диапазоне от 20Hz до 1MHz показало, что при низкой частоте от 1Hz - 10Hz, которая характеризует аккумуляцию ионов на границах с транспортными слоями, и темновые, и световые кривые $C-f$ показывают наибольшую емкость для контрольного образца, и наименьшую для устройства с ПЕГ-илированными УНТ, что может происходить из-за пассивации путей миграции ионов Γ и пассивации самих ионов за счет координационной и водородной связи углеродными наноточками, а так же за счет более стабильной структуры перовскита $FACsPbI_3$, что препятствует его распаду на составляющие и образованию PbI_2 фазы, что является источником ионов Γ [3,4].

1 Kim H. S. et al. Control of I–V hysteresis in $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cell //The journal of physical chemistry letters. – 2015. – V. 6. – №. 22. – P. 4633-4639.

2 Bae S. et al. Electric-field-induced degradation of methylammonium lead iodide perovskite solar cells //The journal of physical chemistry letters. – 2016. – V. 7. – №. 16. – P. 3091-3096.

3 Lan D. The physics of ion migration in perovskite solar cells: Insights into hysteresis, device performance, and characterization //Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2020. – V. 28. – №. 6. – P. 533-537.

4 Bou A. et al. Beyond impedance spectroscopy of perovskite solar cells: Insights from the spectral correlation of the electrooptical frequency techniques //The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2020. – V. 11. – №. 20. – P. 8654-8659.

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАНОПЛАСТИН CdSe ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРОМ

Парамонов Р.Д., Коломыцева А.А., Ромашова А.Е.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., Щербинин Д.П.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

roman.d.paramonov@gmail.com, ss.salazar@mail.ru, alyona10.com@gmail.com

Введение. В настоящее время исследования полупроводниковых наноструктур являются актуальной задачей, поскольку такие структуры обладают уникальными оптическими и электронными свойствами, в том числе зависимостью их спектральных характеристик поглощения от размеров и формы наночастиц [1]. Эти особенности делают их перспективными для применения в устройствах управления светом с помощью света, что применяется в оптоэлектронике и элементах оптической логики [2,3]. Кроме того, дополнительная степень контроля оптических свойств наночастиц может быть достигнута за счет реализации оптического эффекта Штарка, при котором наблюдается расщепление и смещение полос поглощения полупроводниковых наноматериалов. В данной работе исследуется влияние интенсивного лазерного излучения на оптические свойства нанопластинок CdSe, в частности, проявление АС Штарк-эффекта.

Основная часть. Целью данной работы является изучение оптического эффекта Штарка в полупроводниковых нанопластинах CdSe с длинноволновым максимумом поглощения на 514 нм. Для этого коллоидные растворы исследуемых нанопластинок были изучены методом спектроскопии накачка-зондирование. В качестве накачки использовались импульсы титан-сапфирового лазера на длине волны 800 нм. В ходе работы был получен спектр поглощения нанопластинок, измеренный на спектрофотометре, а также карта наведенного поглощения, из которой, в свою очередь, были получены данные об изменении поглощения нанопластинок при оптической накачке. Вычитанием данных по изменению поглощения нанопластинок из их спектра поглощения был построен восстановленный спектр поглощения нанопластинок CdSe в момент накачки. Длительность импульса накачки составляла 100 фс при плотности мощности 39 ГВт/см². На полученном спектре видно, что при воздействии импульса накачки на нанопластинки происходит расщепление длинноволнового пика поглощения на два дополнительных пика и сдвиг спектра в коротковолновую область, что можно интерпретировать как сдвиг и расщепление энергетических уровней и проявление оптического эффекта Штарка [4].

Заключение. В данной работе было показано, что под действием мощного лазерного излучения в нанопластинах CdSe проявляется оптический Штарк-эффект, приводящий к изменению спектров поглощения. Полученные результаты демонстрируют возможность управления оптическими свойствами наноструктур с помощью лазерного воздействия, что представляет интерес для разработки устройств управления светом с помощью света, в частности, для создания элементов оптической логики и быстродействующих фотонных переключателей.

Список использованных источников:

1. Joudeh N., Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists //Journal of Nanobiotechnology. – 2022. – V. 20. – №. 1. – P. 262.
2. Yu J. et al. Recent advances in optical and optoelectronic data storage based on luminescent nanomaterials //Nanoscale. – 2020. – V. 12. – №. 46. – P. 23391-23423.
3. Tregubov A. A., Nikitin P. I., Nikitin M. P. Advanced smart nanomaterials with integrated logic-gating and biocomputing: dawn of theranostic nanorobots //Chemical reviews. – 2018. – V. 118. – №. 20. – P. 10294-10348.
4. Xiang D. et al. Coupled double optical stark effect in CdSe colloidal nanoplatelets //ACS Photonics. – 2021. – V. 8. – №. 3. – P. 745-751.

НОВЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ДИОКСИДА ТИТАНА И ТИТАНАТОВ ДЛЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАВА NaK-78 В КАЧЕСТВЕ РЕАГЕНТА

Громов Н.В., Баринов М.А.

Научный руководитель – м.н.с. Леончук С.С.

Университет ИТМО

nik.gromov.2002@mail.ru

В настоящее время пьезокатализ привлекает значительное внимание, поскольку он позволяет напрямую преобразовывать механическую энергию в пьезопотенциал для каталитических применений. Красители широко используются в различных отраслях промышленности, однако их отходы обладают высокой устойчивостью и токсичностью, что приводит к серьезным экологическим проблемам. В отличие от традиционных катализаторов, пьезокатализаторы предлагают устойчивую и экономически эффективную альтернативу для разложения красителей за счет генерации высокореактивных кислородных соединений и других радикалов. Это открывает значительные перспективы для очистки сточных вод от органических загрязнителей [1].

Одними из наиболее распространенных пьезоэлектриков являются титанаты различных металлов (PbTiO_3 , ZnTiO_3 , CuTiO_3 , BaTiO_3 и др.). В настоящее время разработано множество методов синтеза этих соединений, включая твердофазные реакции, метод расплавленных солей, гидро-/сольвотермальный метод и золь-гель технологию [2]. Обычно диоксид титана получают путем гидролиза хлорида титана (IV). Основная проблема этой реакции заключается в интенсивном выделении хлороводорода в атмосферу, что опасно для экспериментатора и может повредить некоторые типы перчаточных боксов.

В данной работе предложен новый метод синтеза диоксида титана с использованием эвтектического сплава натрий-калий (NaK-78), который остается жидким при комнатной температуре. Высокий восстановительный потенциал NaK позволяет восстанавливать различные металлы из их хлоридов. Реакция эмульсий NaK-78 в органическом растворителе (эфире или углеводороде) с хлоридом титана (IV) приводит к образованию пористых микро- и наночастиц титана, которые сразу же окисляются кислородом воздуха до диоксида титана без побочных эффектов и выделения хлороводорода, в отличие от традиционных методов. Полученный продукт может быть использован для синтеза различных титанатов путем последующей сольвотермальной реакции с оксидами соответствующих металлов. Этот метод синтеза диоксида титана прост и нетоксичен, что дает преимущество перед традиционным гидролизом хлорида титана в лабораторных условиях.

Разработан метод синтеза титанатов с использованием эвтектического сплава натрий-калий на основе хлорида титана(IV). Ключевыми преимуществами и перспективами данного метода являются нетоксичность и простота синтеза пьезоэлектриков на основе титанатов, которые ускоряют разложение органических красителей при очистке сточных вод.

- 1 Zhou L. et al. Recent advances in piezocatalysts for dye degradation //Advanced Sustainable Systems. – 2024. – V. 8. – №. 8. – P. 2300652.
- 2 Wang C. et al. Versatile titanates: Classification, property, preparation, and sustainable energy catalysis //Advanced Functional Materials. – 2022. – V. 32. – №. 5. – P. 2108350.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ С ОБОЛОЧКОЙ, СПОСОБНЫХ ГЕНЕРИРОВАТЬ КОГЕРЕНТНЫЕ ВОЛНЫ

Носов И.А.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Головкина М.В.

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики»
ilyanosov0@gmail.com

В работе рассматриваются наночастицы с оболочкой, которые могут генерировать когерентное излучение. В основе их работы лежит плазмонный резонанс. Исследуемая наночастица изображена на рисунке 1. Она представляет собой ядро из метаматериала и оболочку из диэлектрика. Снаружи расположены хромофоры для усиления генерации излучения. Электроны, насыщаясь энергией падающей волны, переходят с долгоживущего уровня на короткоживущий, где находятся недолго. Затем с этого уровня они перемещаются на уровень ниже, создавая инверсию населенности. Описание того, как молекулы активной среды воздействуют на излучение спазера, есть в работе [2].

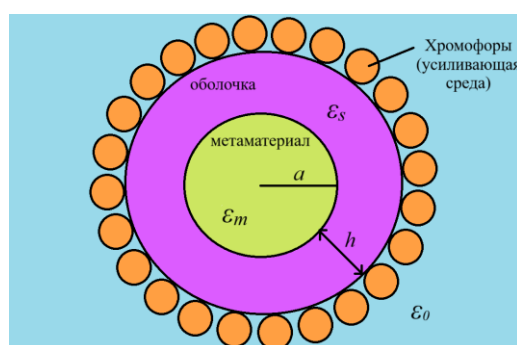


Рисунок 1 – Строение наноплазмонного источника, где ϵ_m - диэлектрическая проницаемость ядра, ϵ_s - диэлектрическая проницаемость оболочки, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость окружающей среды, a – радиус ядра, h – толщина оболочки

Диэлектрическую проницаемость метаматериала можно найти по следующей формуле:

$$\epsilon_m = \epsilon_b - \frac{\omega_e^2}{\omega(\omega + i\gamma_e) - \omega_r^2}, \quad (1)$$

где ϵ_b – диэлектрическая проницаемость окружающей среды, ω - частота поля поверхностного плазмона, ω_e – плазменная частота электронов, ω_r – постоянная, зависящая от геометрических размеров включений, γ_e – электрическая часть коэффициента затухания.

Рассчитать частоту генерации можно предварительно преобразовав условие из работы [2] в следующем виде:

$$\epsilon_m = \frac{2 \left(1 + \frac{h}{a}\right)^{-3} \epsilon_s (\epsilon_s + \epsilon_0) - 2 \epsilon_s (\epsilon_s + 2 \epsilon_0)}{\epsilon_s + 2 \epsilon_0 + 2 \left(1 + \frac{h}{a}\right)^{-3} (\epsilon_s - \epsilon_0)}, \quad (2)$$

где ϵ_m - диэлектрическая проницаемость ядра, ϵ_s - диэлектрическая проницаемость оболочки, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость окружающей среды, a – радиус ядра, h – толщина оболочки.

Данное уравнение решается только численно, если в средах огромные потери. Если потери малы, то частоту генерации можно найти следующим образом:

$$\omega_{th} = \frac{\omega_e}{\sqrt{\epsilon_b + \frac{2 \left(1 + \frac{h}{a}\right)^{-3} \epsilon_s (\epsilon_s + \epsilon_0) - 2 \epsilon_s (\epsilon_s + 2 \epsilon_0)}{\epsilon_s + 2 \epsilon_0 + 2 \left(1 + \frac{h}{a}\right)^{-3} (\epsilon_s - \epsilon_0)}}}. \quad (3)$$

Имея данные выражения, можно увидеть зависимость частоты генерации от размеров спазера. На рисунке 2 изображены кривые, зависящие от радиуса ядра. На рисунке 3 изображены кривые, зависящие от толщины оболочки. Параметры метаматериала: $\omega_e = 1,37 \cdot 10^{16}$ рад/с, $\gamma_e = 2,73 \cdot 10^{13}$ рад/с. Диэлектрические проницаемости оболочки и окружающей среды $\epsilon_s = 2 - 0,02i$ и $\epsilon_o = 2 - 0,02i$.

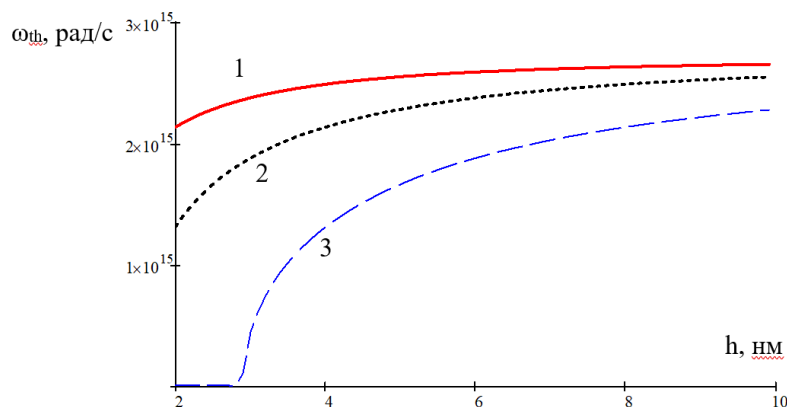


Рисунок 2 – Зависимость частоты генерации наночастицы от толщины оболочки. Кривая 1: радиус ядра $a=5$ нм. Кривая 2: радиус ядра $a=10$ нм. Кривая 3: радиус ядра $a=20$ нм

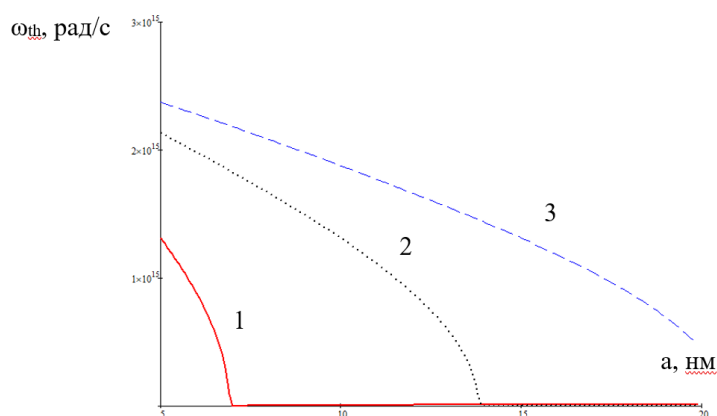


Рисунок 3 – Зависимость частоты генерации наночастицы от размеров ядра. Кривая 1: толщина оболочки $h=1$ нм. Кривая 2: толщина оболочки $h=2$ нм. Кривая 3: толщина оболочки $h=3$ нм

Результаты, полученные в работе, могут использоваться для создания спазеров, работающих в широком диапазоне частот.

1 Lu C. Y. Metal-cavity surface-emitting microlaser at room temperature / C. Y. Lu, S. W. Chang, S. L. Chuang [et al.] // J. of Applied Physics Letters. – 2010. – V. – P. 4.

2 Парфеньев В.М. Нелинейные явления в плазмонике и гидродинамике: теория спазера и генерация завихренности поверхностными волнами : специальность 01.04.02 “Теоретическая физика” : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / В. М. Парфеньев ; научный руководитель В. В. Лебедев ; ФГБУН Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН. – 2016. – С. 110.

3 Golovkina M.V. Plasmon resonance at the interface dielectric - nanocomposite material with superconducting inclusions / M.V. Golovkina // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia, 2021. – P. 22025.

СТРИМЕРНЫЙ РАЗРЯД КАК МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ 2D СТРУКТУР КАРБИДА КРЕМНИЯ

Кирюшина Е.С.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доц. Солдатенко С.А.

ФГБОУ ВО "Воронежский Государственный Технический Университет", г. Воронеж, Россия
cat.kiru@gmail.com

В работе исследован механизм образования наноструктур карбида кремния (SiC) с кубической фазой B20 в результате воздействия стримерного разряда в монокристалле 4H-SiC. Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и микродифракционного анализа установлено, что под действием высоковольтного пробоя происходит фрагментация кристалла с образованием нанопластин SiC (B20) латеральным размером 20–100 нм.

Показано, что формирование метастабильной фазы B20 связано с бездиффузионным фазовым переходом, индуцированным высокой концентрацией неравновесных носителей ($\sim 6 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$) в плазменных каналах стримера. Обсуждаются механизмы разрушения кристаллической решетки, включая ударную ионизацию, джоулев нагрев и образование ударных акустических волн.

Показано, что стримерный разряд в полупроводниковых характеризуется высокой скоростью (до 10^7 м/с), узким токонесущим каналом (0,1–10 мкм) и значительным локальным нагревом, что способствует фазовым переходам и структурным изменениям. Анализ ПЭМ-изображений (рис. 1) подтверждает образование как фаз B20, так и гексагональной 4H-SiC с искажённой решеткой. Последняя ориентирована по оси $\langle 0001 \rangle$ вдоль электронного пучка. Под действием локального напряжения до 21 ГПа происходит сжатие и фазовый переход $\beta\text{-SiC} \rightarrow \text{B20}$.

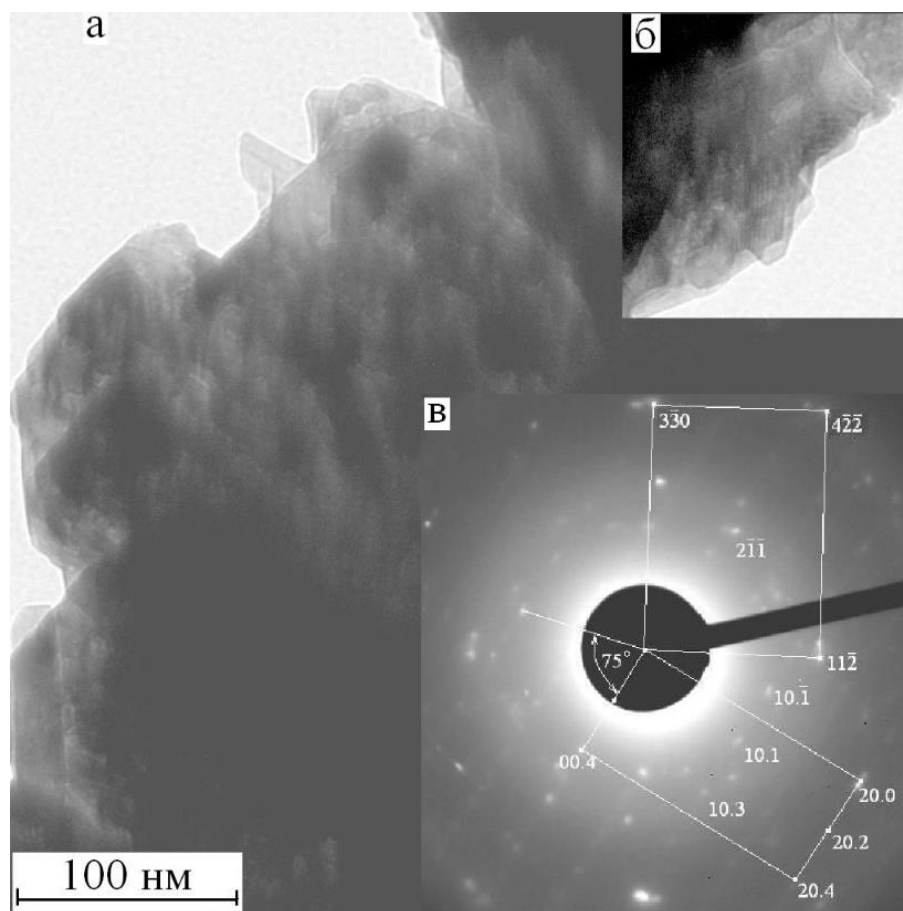


Рисунок 1 – ПЭМ изображения (а, б) и картина микродифракции (в) наночастицы SiC после воздействия стримерного разряда

Метастабильные фазы, полученные в условиях стримерного разряда, обладают потенциалом для применения в опто- и силовой электронике. Стримерный разряд, благодаря своим уникальным характеристикам, также используется в ограничителях перенапряжений, лавинных фотодиодах и микроразрядных переключателях.

Результаты демонстрируют перспективность использования стримерного разряда для синтеза двумерных метастабильных фаз SiC с уникальными электрофизическими свойствами.

1. Кускова Н.И. Искровые разряды в конденсированных средах // Журнал технической физики. — 2001. — Т. 71, №2. — С. 52–54.

2. Соловьев В.А., Попов И.В. Особенности стримерного пробоя в SiC // Физика и техника полупроводников. — 2018. — Т. 52, №9. — С. 1147–1152.

3. Исаев С.И., Кулешов М.А. Формирование наноструктур при высоковольтных разрядах в полупроводниках // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2020. — №3. — С. 74–78.

4. Логинов К.В. Стримеры в широкозонных полупроводниках: физика и применение // Техническая физика. — 2017. — Т. 62, №4. — С. 545–550.

5. Пашков А.В. Нестабильные фазы SiC в условиях электрофизического воздействия // ФТТ. — 2019. — Т. 61, №11. — С. 1834–1839.

СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМ ПЕРОВСКИТОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОПЛАСТИН PbSe/PbS

Клименко Д.И., Черевков С.А., Скурлов И.Д.

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Черевков С.А.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

ohiko27@gmail.com

Полупроводниковые двумерные нанокристаллы благодаря своей морфологии и оптическим свойствам — узким, в сравнении с квантовыми точками, полосам поглощения и фотолюминесценции — являются одним из самых перспективных материалов для создания фотонных устройств, например, светодиодов. Регулируя условия синтеза (температуру, время, соотношение прекурсоров) и постсинтетической обработки, а также создавая гетероструктуры тройного и четвертичного состава с различной архитектурой (ядро/оболочка, ядро/крылья, ядро/крылья/оболочка и т.д.) и толщиной исходных структур и оболочки, возможно гибко настраивать оптические свойства двумерных нанокристаллов в видимом и ИК-диапазоне.

Полупроводниковые двумерные квантовые гетероструктуры типа ядро/оболочка и ядро/крылья PbSe/PbS получены методом катионного обмена в инертной атмосфере из исходных гетероструктур CdSe/CdS [1 – 3]. Пассивация поверхности двумерных нанокристаллов PbSe/PbS неорганическим перовскитом CsPbCl₃ осуществлялась путем замены олеиновой кислоты и последующего фазового перехода, происходившего в процессе смешивания неполярного растворителя, содержавшего нанопластины (НП) PbSe/PbS, с полярным растворителем – диметилформамидом (DMF) содержащим прекурсоры чернил перовскита [4].

Светоизлучающие диоды с понижающей конверсией (DC-LED) были изготовлены с использованием стандартной структуры, предназначенной для преобразования энергии синего излучения. Для изготовления светоизлучающих диодов использовалась стандартная структура, хорошо зарекомендовавшая себя при производстве как OLED [5], так и светодиодов на основе углеродных точек [6]. В качестве прозрачного анода использовался слой оксида индия-олова (ITO) на стеклянных подложках. На очищенную поверхность ITO был нанесен слой для инжекции дырок (PEDOT:PSS). Все последующие слои осаждались в перчаточном боксе, заполненном азотом. Слой для переноса дырок (PolyTPD) был нанесен методом spin-coating, эмиссионный слой наносили из толуольного раствора. Остальные слои осаждались в вакуумной камере при давлении $1 - 2 \times 10^{-6}$ мбар. В качестве электронно-транспортного/дырочного блокирующего слоя использовался TPBi толщиной 30 нм. Затем был добавлен тонкий слой LiF (~1 нм), чтобы изменить рабочую функцию электронов с 4,28 эВ (алюминий) до 2,9 эВ. В качестве катода был нанесен слой алюминия толщиной 60 – 70 нм.

Сравнение спектров фотолюминесценции НП PbSe/PbS с исходными поверхностными лигандами (ОА) и пассивированных CsPbI₃ показало, что значительное увеличение интенсивности ФЛ и, как следствие, квантового выхода ФЛ, характерно для образцов НП с йодной перовскитной оболочкой. При этом положение полосы ФЛ остается практически неизменным. Наблюдается увеличение FWHM полосы ФЛ на 10 мэВ для двумерных гетероструктур типа ядро/оболочка и на 40 мэВ для гетероструктур типа ядро/крылья.

Спектры электролюминесценции изготовленных устройств совпадают со спектрами ФЛ и в зависимости от синтеза исходных пассивированных двумерных гетероструктур могут находиться в пределах 1350 – 1600 нм для устройств на основе НП со структурой ядро/крылья и 1500 – 1800 нм для устройств на основе НП со структурой ядро/оболочка.

Энергетическая яркость светодиодов с понижающей конверсией в ИК-области спектра, при токе 1,37 мА, составила 5,5 и 2 кд/м² для устройства на основе НП со структурой ядро/оболочка и для устройства на основе НП со структурой ядро/крылья, соответственно.

Напряжение включения светодиодов со структурой ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/NP/TPBi/LiF/Al и активным слоем из НП PbSe/PbS со структурой ядро/крылья,

пассивированных перовскитом CsPbI₃ составило $3,1 \pm 0,2$ В, яркость лучшего из полученных устройств — 5 мкд/м² при токе 0,16 А.

1. Skurlov I. et al. Temperature-Dependent Photoluminescent Properties of PbSe Nanoplatelets // *Nanomaterials*. – 2020. – V. 10. – №. 12. – P. 2570.
2. Kelestemur Y. et al. Platelet-in-Box Colloidal Quantum Wells: CdSe/CdS@ CdS Core/Crown@ Shell Heteronanoplatelets // *Advanced Functional Materials*. – 2016. – V. 26. – №. 21. – P. 3570-3579.
3. Prudnikau A., Chuvilin A., Artemyev M. CdSe–CdS nanoheteroplatelets with efficient photoexcitation of central CdSe region through epitaxially grown CdS wings // *Journal of the American Chemical Society*. – 2013. – V. 135. – №. 39. – P. 14476-14479.
4. Zhang X. et al. Inorganic CsPbI₃ perovskite coating on PbS quantum dot for highly efficient and stable infrared light converting solar cells // *Advanced Energy Materials*. – 2018. – V. 8. – №. 6. – P. 1702049.
5. Kozlov M. I. et al. Solution-Processed OLED Based on a Mixed-Ligand Europium Complex // *Materials*. – 2023. – V. 16. – №. 3. – P. 959.
6. Cherevko S. A. et al. Amphiphilic acetylacetone-based carbon dots // *Journal of Materials Chemistry C*. – 2024. – V. 12. – №. 11. – P. 3943-3952.

ПОЛИМЕРНАЯ КОМПОЗИТНАЯ ПЛЁНКА С ГАЛОГЕНИДНЫМИ ПЕРОВСКИТАМИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Седегова Т.Ю.

Научный руководитель – к. ф-м. н. Клинков В.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

TatianaSedegova@yandex.ru.

Растущее глобальное энергопотребление обуславливает необходимость повышения эффективности генерации электроэнергии. На сегодня в этом контексте важное значение приобретают возобновляемые источники энергии, одним из основных среди которых является направление фотовольтаики. Актуальной научной задачей является повышение коэффициента полезного действия солнечных элементов, которые эффективно работают только в видимом спектральном диапазоне. Одним из перспективных подходов к решению проблемы является применение функциональных композитных плёнок с наполнением из галогенидных перовскитов, которые конвертируют ультрафиолетовое излучение в видимый диапазон.

Ключевым недостатком перовскитов, ограничивающим их широкое применение, является низкая стабильность и склонность к деградации под воздействием влаги и кислорода. Для повышения эксплуатационной долговечности высоким потенциалом обладает метод инкапсуляции перовскитов в инертную стеклообразную матрицу, которая обеспечивает их изоляцию от внешней среды, сохраняя при этом люминесцентные свойства. В настоящей работе в качестве такой матрицы предложена фосфатная система, обладающая высокой оптической прозрачностью в рабочем спектральном диапазоне, низкой температурой синтеза и высокой растворимостью добавок [1]. Для практического применения разработанные стеклокомпозиты удобно интегрировать в составе полимерной плёнки на рабочую поверхность солнечного элемента.

Предлагаемый принцип повышения эффективности устройства фотовольтаики заключается в конверсии высокоэнергетичной части диапазона излучения Солнца в эксплуатационный диапазон солнечного элемента. Стандартные кремниевые солнечные панели эффективно поглощают излучение в видимой области спектра, а в ультрафиолетовой части спектра их чувствительность значительно ниже. Галогенидные перовскиты обладают высокой поглощающей способностью в ультрафиолетовом диапазоне и высоким квантовым выходом люминесценции в видимом диапазоне [2]. Такие кристаллы позволят использовать ранее неэксплуатируемую часть энергии звезды.

Объектом исследования являлись полимерные композитные материалы на основе стеклообразной системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-La}_2\text{O}_3$, содержащей кристаллы перовскитов CsPbBr_3 и CsPbCl_3 . В работе были изучены спектральные и люминесцентные характеристики полученных образцов. Установлено, что кристаллы бромидного перовскита, сформированные в данной стеклообразной системе, имеют высокий выход люминесценции, но обладают недостаточной для фотовольтаики прозрачностью в видимом диапазоне. Кристаллы хлоридных перовскитов прозрачны в эксплуатируемом диапазоне, однако обладают низким выходом люминесценции. Для реализации описанной идеи требуется синтезировать более сложные структуры на основе смешанных перовскитов.

1 Li S. et al. CsPbX_3 (X= Cl, Br, I) perovskite quantum dots embedded in glasses: Recent advances and perspectives //Chemical Engineering Journal. – 2022. – V. 434. – P. 134593.

2 Zhou Y. et al. Nonlinear optical properties of halide perovskites and their applications //Applied Physics Reviews. – 2020. – V. 7. – №. 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ НАНОСТРУКТУРНОЙ МЕДИ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Яшарова Е.В.^{1,2}, Гангалю А.Н.^{1,3}

¹ ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», г. Донецк, РФ

² ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», г. Донецк, РФ

³ ФГБНУ «Институт физики горных процессов», г. Донецк, РФ

yasharova.liza@yandex.ru

В современной науке активно исследуются наноструктурные материалы (НС), которые в отличие от крупнокристаллических обладают уникальными свойствами, такими как повышенная прочность, аномальная пластичность и высокая коррозионная стойкость, что перспективно для создания принципиально нового уровня технологий. Получение НС материалов в основном осуществляется методами интенсивной пластической деформации, однако применение большинства из них ограничено необходимостью последующего формообразования для практического использования [1]. Для этого применяют такие методы, как прокатка, волочение, экструзия, в которых заготовка вытягивается вдоль продольной оси, вследствие чего формируется направленная структура. Это открывает новые возможности управления свойствами материалов. Гидроэкструзия (ГЭ) представляет собой эффективный метод обработки металлов давлением, обеспечивающий высокие сжимающие напряжения, что благоприятно для формирования структуры и свойств [2-3]. Однако влияние направленности структуры, сформированной обработкой ГЭ, на механические свойства НС меди изучено недостаточно.

Цель данной работы заключается в исследовании влияния самоорганизации наноструктуры меди в процессе обработки гидроэкструзией на механические свойства материала.

В работе использовали бескислородную медь марки М06, после предварительного отжига (600°C , 2ч.) и равноканального углового прессования (РКУП). НС состояние меди получено после 12 переходов РКУП по маршруту В_с через матрицу с углом пересечения каналов $\Phi=90^{\circ}$. Это позволило накопить суммарную эквивалентную деформацию $\epsilon_{\text{РКУП}}=12$.

Гидроэкструзия НС меди осуществлялась одноцикловым деформированием через коническую матрицу с углом конусности $2\alpha=20^{\circ}$ и использованием индустриального масла в качестве рабочей среды. Эквивалентная пластическая деформация ГЭ варьировавшейся в интервале $\epsilon_{\text{ГЭ}}=0,3-1,2$.

Изменения структуры в процессе ГЭ анализировали с использованием просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Для этого вдоль оси деформирования вырезались пластины, которые шлифовали на абразивной бумаге до толщины 100 мкм и полировали на алмазных пастах. Из полученных фольг вырезали диски диаметром 4мм которые подвергали электрополировке в электролите на основе ортофосфорной и серной кислот с добавлением хромового ангидрида.

ПЭМ показала (рис.1), что в исходном состоянии после РКУП структура меди состоит из равноосных зерен размером 200 – 300нм и высокоугловой разориентировкой их границ. После обработки ГЭ с максимальной степенью деформации ($\epsilon_{\text{ГЭ}}=1,2$) размеры зерен в поперечном направлении к оси экструзии практически не изменились, а в продольном направлении к оси экструзии размер зерен увеличился до 400-500нм. Это свидетельствует о формировании аксиальной текстуры, вызванной постоянством направления деформирования в процессе ГЭ [4].

Для оценки изменения механических свойств НС меди в процессе придания направленности структуры методом ГЭ измеряли твердость по Виккерсу вдоль оси деформирования с нагрузкой 5 кг. Также проводили испытания на растяжение. Из полученных заготовок после ГЭ вытачивали образцы по ГОСТ 1497–84 с диаметром разрывной части 5 мм. Полученные результаты приведены в таблице 1.

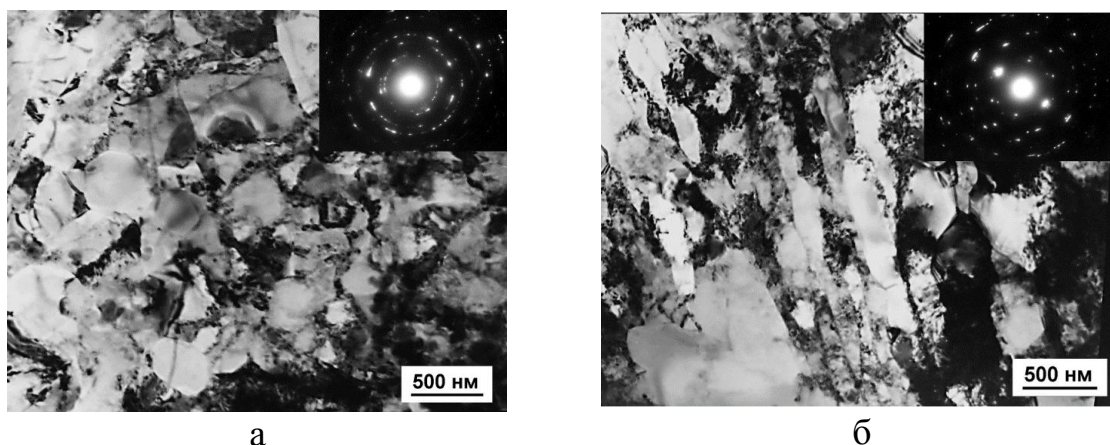


Рисунок 1 – Просвечивающая электронная микроскопия НС меди в направлении вдоль оси деформирования: а – после РКУП, б – после последующей обработки ГЭ $\epsilon_{ГЭ}=1,2$.

Таблица 1 Влияние деформации ГЭ на изменение механических свойств НС меди сформированной методом РКУП

$\epsilon_{ГЭ}$	HV, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
0	1350±10	434±10	19,3±0,4	77,0±2,2
0,3	1275±10	459±8	19,9±0,3	85,8±2,0
0,6	1238±10	476±7	19,1±0,3	86,7±1,8
0,9	1154±11	477±8	18,9±0,3	88,8±2,1
1,2	1146±10	431±14	21,0±0,4	91,1±1,8

Из таблицы 1 видно, что с увеличением степени деформации ГЭ твердость в продольном направлении к оси деформирования монотонно понижается на всем интервале деформирования с HV=1350±10МПа до HV=1146±10МПа. Это связано с увеличением размеров зерен при их вытягивании в направлении экструзии. Прочность нелинейно возрастает с $\sigma_b=434\pm10$ МПа до $\sigma_b=477\pm8$ МПа за счет формирования аксиальной текстуры (рис 1б), затем происходит резкое падение величины до $\sigma_b=431\pm14$ МПа при $\epsilon_{ГЭ}=1,2$, что согласно [5] связано с запуском процесса динамической рекристаллизации за счет разогрева заготовок в процессе ГЭ, а также, по-видимому, снижением плотности дислокаций. Релаксационный процесс при $\epsilon_{ГЭ}=1,2$ приводит к росту относительного удлинения до максимального значения $\delta=21\pm0,4\%$ при значении в исходном состоянии $\delta=19,3\pm0,4$. Относительное сужение возрастает на всем интервале деформаций с $\psi=77,0\pm2,2\%$ до $\psi=91,1\pm1,8\%$.

1 A. V. Volokitin, I. E. Volokitina, A. I. Denisova, M. Seref Sonmez. Severe plastic deformation methods influence on the structure and properties of metal materials: A review. Johnson Matthey Technol. Rev., 2025, 69, (2), 198–213.

2 Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Спусканюк В.З. Теория и практика гидроэкструзии – Киев: Наукова Думка, 2007. – 245 с.

3 Сенникова Л.Ф., Гангалю А.Н., Свиридова Е.А., Васильев С.В., Ткаченко В.М. Влияние разовой степени деформации гидроэкструзией на механические свойства сплава АМц, предварительно обработанного равноканальным угловым прессованием. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2024. №4 (87). С. 71-76.

4 Утяшев Ф.З. Научные основы деформационных технологий формирования ультрамелкозернистых и наноструктурных объемных материалов: монография / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб; Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 160с.

5 Pachla W., Rulczyk M., Smalc-Koziorowska J., Przybysz S., Wroblewska M., Skiba J., Przybysz M. Enhanced strength and toughness in ultra-fine grained 99.9% copper obtained by cryo-hydrostatic extrusion // Materials Characterization. – 2018. – V.141. – P. 375–387.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РОСТ И МОРФОЛОГИЮ ЗОЛОТЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БОРОВСКОЙ-ТУРКЕВИЧА-ФРЕНСА

Умарова А.Ш.¹, Лукьяненко А.В.²

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия
amina-umarova-2016@mail.ru

Интерес к золотым наночастицам (ЗНЧ) обусловлен их уникальными физико-химическими свойствами, в частности, оптическими, связанными с локализованным поверхностно-плазмонным резонансом (ЛППР) – коллективным колебанием свободных электронов, возбуждаемым падающим светом [1]. Положение резонансного пика зависит от размера и формы ЗНЧ, что позволяет настраивать спектральный отклик от видимой до ближней инфракрасной области. Благодаря этим свойствам ЗНЧ находят широкое применение в разных областях науки. Целью работы является изучение влияния температурных условий синтеза на морфологию и связанные с ней оптические свойства ЗНЧ.

ЗНЧ были получены методом Боровской-Туркевича-Френса, который основан на восстановлении ионов золота из кипящего водного раствора золотохлористоводородной кислоты HAuCl_4 с использованием цитрата натрия $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$. Для анализа влияния температуры и соотношений реагентов был проведён ряд синтезов, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры синтезов образцов наночастиц

№ образца	Размер ЗНЧ, нм	Объём HAuCl_4 , мл	Объём $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$, мл	Температура синтеза, °С	Длина волны ЛППР, нм
1	22,0±0,3	50	3	100	522
2	23,9±0,8		5	95	530
3	27,1±0,2		3	92	532

Размеры полученных частиц были охарактеризованы при помощи просвечивающего электронного микроскопа Hitachi HT7700 и программы ImageJ.

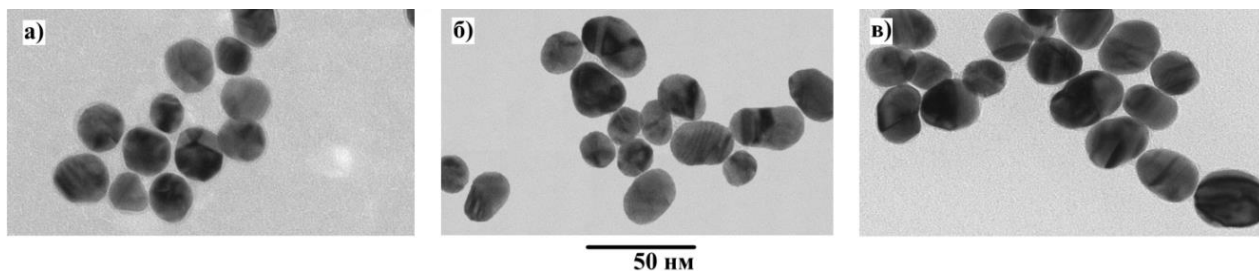


Рисунок 1 – ПЭМ изображения ЗНЧ: а) Образец 1; б) Образец 2; в) Образец 3

Анализ ПЭМ-изображений (см. Рис. 1) свидетельствует о незначительном отклонении формы наночастиц от сферической, что указывает на влияние параметров синтеза на морфологию частиц. Одним из ключевых параметров является температура, которая влияет на размер наночастиц: с повышением температуры уменьшается конечный размер наночастиц золота за счёт активного протекания процесса нуклеации. Однако температура синтеза оказывает влияние не только на размер частиц, но и на их форму. При температуре синтеза 100°C формируются близкие к изотропной форме наночастицы, но с понижением температуры скорость нуклеации снижается и рост частицы становится энергетически избирательным [2]. Как демонстрирует Рис. 1, с понижением температуры синтеза частицы приобретают эллиптическую форму.

Оптические спектры ЗНЧ, представленные на Рис. 2а, были получены с помощью спектрометра Shimadzu UV-3600.

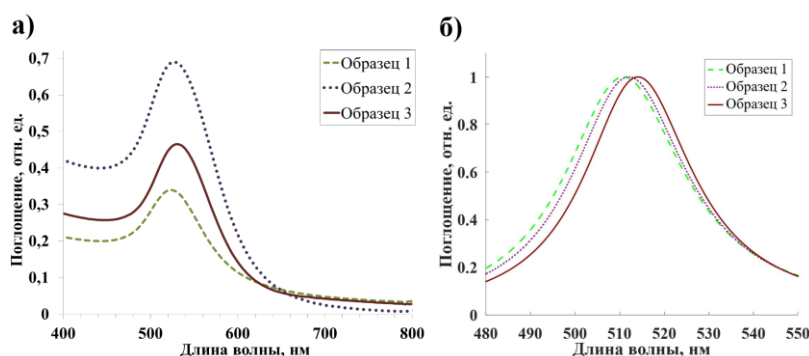


Рисунок 2 – Оптические спектры поглощения ЗНЧ: а) экспериментальные; б) смоделированные

Анализ полученных спектров показывает, что с увеличением размеров ЗНЧ наблюдается смещение пика ЛППР в сторону длинных волн (Табл. 1), что согласуется с теорией, полученной на основе дипольного приближения [3]. В этом приближении взаимодействие частицы с падающим светом описывается её поляризуемостью α :

$$\alpha = 4\pi R^3 \frac{(\varepsilon_{in} - \varepsilon_{out})}{(\varepsilon_{in} + 2\varepsilon_{out})} \quad (1)$$

где R – радиус ЗНЧ, ε_{in} – диэлектрическая проницаемость золота, ε_{out} – диэлектрическая проницаемость окружающей среды.

На основе формулы 1 были выполнены расчёты, позволившие смоделировать спектры поглощения (см. Рис. 2б). Моделирование подтвердило, что увеличение радиуса ЗНЧ приводит к смещению длины волны ЛППР в сторону длинных волн, что согласуется с экспериментальными данными.

В работе была исследована зависимость морфологических и оптических характеристик от температурных условий синтеза, проведённого по методу Боровской-Туркевича-Френса. Повышение температуры способствует увеличению числа центров нуклеации, приводя к формированию ЗНЧ меньших размеров. При пониженных температурах наблюдается анизотропный рост. Анализ оптических спектров выявил смещение длины волны ЛППР в сторону длинноволновой области с увеличением размеров частиц, что согласуется с теоретическими расчётами. Результаты демонстрируют возможность управления морфологией и оптическими свойствами ЗНЧ посредством изменения условий синтеза.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 23-12-20007 и Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-исследовательской деятельности, соглашение № 256.

1 Park J. M., Choi H. E., Kudaibergen D., Kim J. H., Kim K. S. Recent advances in hollow gold nanostructures for biomedical applications // *Frontiers in Chemistry*. – 2021. – V. 9. – P. 699284.

2 Link S., El-Sayed M. A. Shape and size dependence of radiative, non-radiative and photothermal properties of gold nanocrystals // *International reviews in physical chemistry*. – 2000. – V. 19 (№. 3). – P. 409-453.

3 Farooq S., Wali F., Zezell D. M., de Araujo R. E., Rativa D. Optimizing and quantifying gold nanospheres based on LSPR label-free biosensor for dengue diagnosis // *Polymers*. – 2022. – V. 14 (№. 8). – P. 1592.

НАНОПОРИСТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ Ti/TiO_2 С ПЛАЗМОННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Курицкий М.С., Цибульников А.В., Лятун И.И., Зюбин А.Ю., Кострина А.А.,
Самусев И.Г.

ФГАОУ ВО "Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта"
Mix-Mux@yandex.ru

Нано- и фемтосекундное лазерное структурирование по праву считается одним из самых популярных и эффективных методов модификации поверхностей путём создания так называемых функциональных поверхностных структур, обладающих уникальными оптическими, механическими, тепловыми, электронными или трибологическими свойствами [1]. Такие метаповерхности вот уже несколько десятилетий находят широкое применение в самых различных областях, от оптики и фотоники до биомедицины и механики.

Оксид титана является идеальной основой для создания подобных структур благодаря своей химической стабильности, широкой полосе пропускания, высокому коэффициенту преломления и диэлектрической проницаемости [2-4]. Лазерно-индуцированные метаповерхности на основе оксида титана обладают ярко выраженным эффектом плазмонного поглощения. Поверхностный плазмонный резонанс в настоящее время является одним из ведущих методом в области биовизуализации и создания высокочувствительных биосенсоров [5].

В настоящем исследовании рассматривается пористая метаповерхность на основе анодированного титана, изготовленная лазерными импульсами длительностью 10 нс при частоте повторения импульсов 10 Гц при плотности мощности 280 мДж/см^2 . Процесс структурирования поверхности проходил при одновременном использовании двух длин волн лазерного излучения – основной (1064 нм) и второй гармоники (532 нм). Уникальность данной оптической схемы состоит в том, что ИК-составляющая излучения фокусируется на поверхности образца, в то время как излучение 532 нм видимого диапазона остаётся расфокусированным. Такой эффект достигается за счёт использования ИК-линзы. В результате описанного подхода поверхность анодированного титана формирует характерную пористую морфологию, включающую нанотрещины шириной 10-40 нм и нанопоры диаметром 70-200 нм (рис. 1, а).

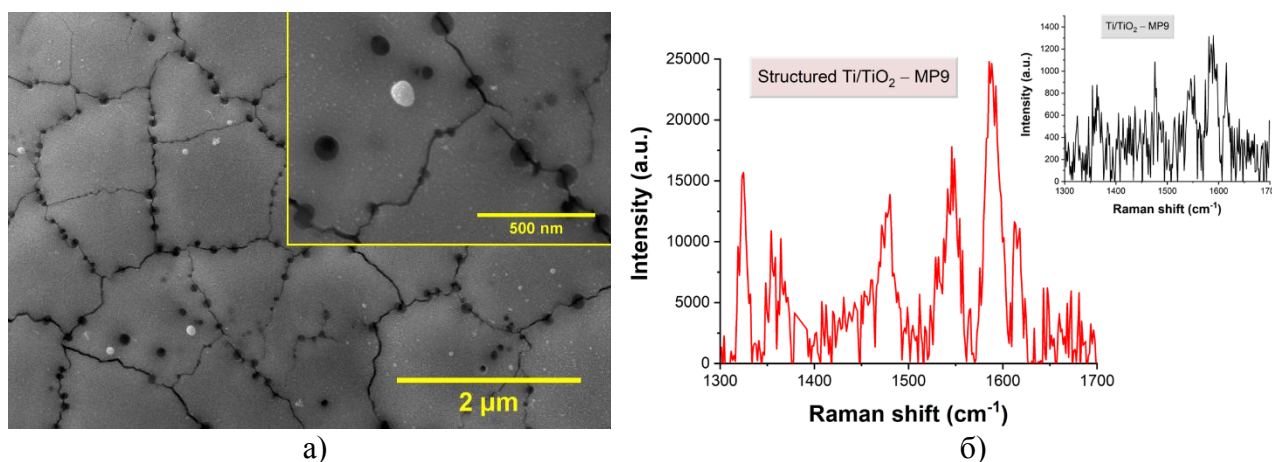


Рисунок 1 – а) СЭМ-изображения структурированной поверхности титана; б) спектры комбинационного рассеяния света от поверхности неструктурированного титана с MP9 (вставка) и структурированного титана с MP9

Высокая плазмонная генерации приготовленной пористой метаповерхности даёт 2-х и 6-кратное усиление сигнала люминесценции (в зависимости от типа морфологии) и 20-кратное усиление сигнала комбинационного рассеяния света от контрольного вещества на

структурированной поверхности титана (“Structured Ti/TiO₂ – MP9”) в сравнении с поверхностью, не подвергавшейся лазерному воздействию (“Ti/TiO₂ – MP9”), при исследовании метаповерхностей методом рамановской спектроскопии (рис. 1, б). В качестве контрольного вещества (люминесцирующей среды) использовался раствор дигидрохлорида мезопорфирина IX (C₃₄H₃₈N₄O₄·2HCl, “MP9”) концентрацией C = 10⁻⁴ М.

Таким образом, синтезированные методом наносекундного лазерного структурирования метаповерхности на основе анодированного титана, обладая при всём прочем высокой смачиваемостью, могут использоваться в составе новых биосенсоров и фотосенсибилизаторов, а также при биовизуализации для усиления сигнала комбинационного рассеяния света от исследуемого вещества и в качестве усилителей люминесцентных свойств слабolumинесцирующих сред.

Настоящее исследование выполнено в рамках Федерального проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZWM-2024-0010).

- 1 Wang H., Deng D., Zhai Z., Yao Y. Laser-processed functional surface structures for multi-functional applications-a review // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – V. 116 – P. 247–283.
- 2 Xiao F. et al. In situ fabrication of NIR-II responsive TiO₂ bio-metasurface for photothermal antibacterial and enhanced osseointegration // Ceramics International. – 2024. – V. 50. – P. 27689–27698.
- 3 Das K., Balla V. K., Bandyopadhyay A., Bose S. Surface modification of laser-processed porous titanium for load-bearing implants // Scripta Materialia. – 2008. – V. 59. – P. 822–825.
- 4 Kwidzinska D. B., Jazdzewska M., Fydrych D. The influence of selected metal oxides and laser modification on the surfaces of titanium alloys – Bibliometric and systematic review // Optics & Laser Technology. – 2025. – V. 184. – 18 p.
- 5 Alhawari A., Almawgani A., Taya S., Daher M., Prajapati Y., Gumaih H. Highly sensitive protein sensor based on surface plasmon resonance nanostructure employing titanium dioxide and graphene layers // Diamond & Related Materials. – 2025. – V. 151. – 7 p.

СОЗДАНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩИХ И МАГНИТОВОСПРИИМЧИВЫХ ГИДРОГЕЛЕВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И ЖЕЛАТИНА

Фомина Е.Д., Лимаренко В.И.

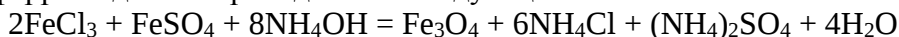
Научный руководитель – к.т.н., доцент Рябков Е.Д.

МИРЭА – Российский технологический университет

limarenko0303@gmail.com

В последние годы гидрогелевые композитные материалы привлекают все большее внимание благодаря ряду своих уникальных физико-химических свойств, а также способности сочетать преимущества гидрогелевой матрицы и функциональных наполнителей. Одной из ключевых задач современной медицины является создания эффективных систем локализованной контролируемой доставки лекарств. В этом контексте токопроводящие и магнитовосприимчивые гидрогели представляют собой многообещающую альтернативу традиционным материалам. Данная работа посвящена получению нанокompозитов на основе гибридного гидрогеля поливинилового спирта и желатина фотографического с использованием в качестве наполнителей углеродных нанотрубок и частиц ферромагнитной жидкости.

Синтез феррожидкости проводили по следующей схеме:



Процесс проводили при 50°C, в качестве стабилизатора частиц использовали раствор олеинового мыла. Спектроскопический анализ полученных частиц показал, что все компоненты дисперсной фазы находятся в нанометровом масштабе. В образце присутствует три фракции частиц, различающихся по среднему размеру: 96,70 нм, 114,78 нм и 134,21 нм (см. Рис.1).

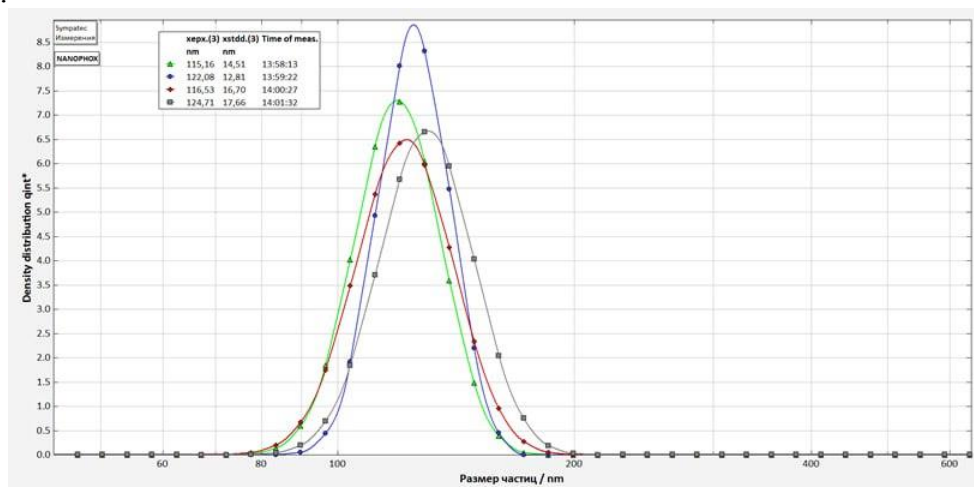


Рисунок 1 – График изменения плотности распределения наночастиц ферромагнитной жидкости от их размера

Получение нанокompозитных гидрогелей проводили *in situ*. Образование гибридной полимерной сети проводили по механизму физического сшивания ПВС и желатина в среде натрий-фосфатного буфера [1]. Далее в реакционную среду вносили навески углеродных нанотрубок и ферромагнитных частиц в концентрациях 13,2 % масс., 14,7 % масс. и 16,1 % масс. В качестве диспергатора использовали 45%-ый водный раствор полиакрилата натрия.

Равновесную и эффективную степени набухания в дистиллированной воде, а также коэффициент удержания воды полученных образцов определяли гравиметрическим методом. Полученные образцы способны набухать более чем в 4 раза. Также наблюдали увеличение значений исследуемых показателей с ростом содержания частиц наполнителей в исследуемых образцах. Это связано с тем, что наночастицы наполнителей за счет электростатического отталкивания расширяли поры внутри полимерной сети, что способствовало лучшей сорбции.

Также увеличению показателей набухания способствовали стерический эффект и электростатическое отталкивание, возникающие между мицеллами ПАВ и длинными алкильными цепями полимерной матрицы. Присутствие наночастиц наполнителей приводило к увеличению плотности и стабильности полимерной, что объясняет высокие значения коэффициента удержания воды.

Анализ упруго-прочностных свойств нанокомпозитов проводили путем растяжения пленкообразных образцов до разрыва. Результаты представлены в Табл. 1.

Таблица 1 – Упруго-прочностные свойства гидрогелевых нанокомпозитов

№ п/п	$\omega_{\text{нап}}$, % масс.	Максимальная нагрузка F, Н	Максимальное удлинение l, мм	Модуль Юнга G, МПа	Максимальное напряжение ϵ , МПа
1	13,2	9,03	69,65	0,13	0,60
2	14,7	18,70	94,75	0,20	1,25
3	16,1	5,05	56,15	0,08	0,34

Для определения проводимости композитов использовали метод вольтамперометрического анализа. Нанокомпозиты в виде тонких пленок наносили на поверхность рабочего электрода гибкой трехэлектродной аналитической системы. Вольтамперограммы полученных покрытий представлены на Рис. 2.

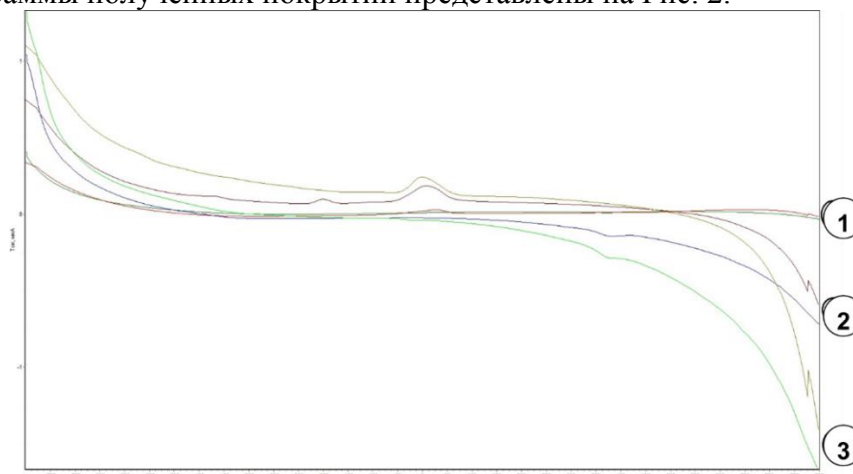


Рисунок 2 – Сравнительная циклическая постоянноточковая вольтамперограмма электродов с покрытиями с $\omega_{\text{нап}}$, % масс.: 1) 13,2; 2) 14,7.; 3) 16,1

Оценку магнитных свойств проводили путем визуальной оценки способности полученных материалов притягиваться к магниту (см. Рис. 3).

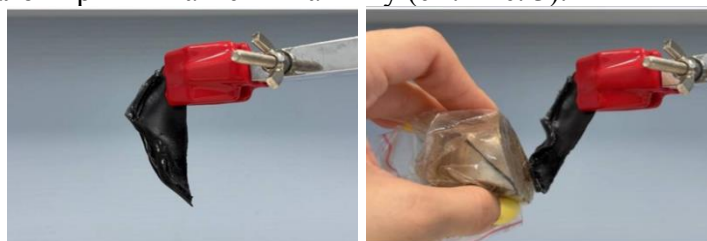


Рисунок 3 - Демонстрация магнитных свойств полученных композитных материалов

Полученные в рамках данной работы нанокомпозиты демонстрируют перспективные свойства для применения в качестве функциональных материалов в области локализованной системы доставки лекарств и гибкой электроники.

1. Zhang R., Xiaoyuan S., Liang H. Polyvinyl alcohol/gelatin hydrogels regulate cell adhesion and chromatin accessibility // International Journal of Biological Macromolecules. – 2022. – V. 219. – P. 672-684

МЕТОД УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, РАЗМЕРА И ПЛОТНОСТИ НАНОЧАСТИЦ

Писарева Е.И.^{1,2}, Мрачковская Д.А.^{1,2}

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук, Курьяков В.Н.¹

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия
pisareva_katya@list.ru

Метод ультрамикроскопии представляет собой аналитический подход, позволяющий количественно оценивать концентрацию наноразмерных частиц в жидких средах. Данная методика была впервые разработана Рихардом Зигмонди, удостоенным в 1925 году Нобелевской премии по химии за достижения в области коллоидной химии.

Принцип работы ультрамикроскопии основан на использовании специальной схемы освещения исследуемого образца. Лазерный луч направляется перпендикулярно (под углом 90°) к оптической оси микроскопа, что обеспечивает регистрацию рассеянного излучения, а не прямого изображения частиц. Наблюдение ведётся с помощью классического оптического микроскопа, однако, в отличие от традиционной микроскопии, визуализация отдельных наночастиц не происходит. Вместо этого фиксируется светорассеяние на частицах, размер которых может достигать 10 нм (в случае металлических нанобъектов). Можно сказать, что это разнovidность темнопольной оптической микроскопии.

Таким образом, ультрамикроскопия позволяет определять концентрацию наночастиц, не обладая разрешением, достаточным для их непосредственного наблюдения, за счёт регистрации эффектов рассеяния лазерного излучения на отдельных нанобъектах. Если для образца раствора наночастиц предварительно известна массовая концентрация (или ее можно измерить по сухому остатку) и материал наночастиц (плотность материала), то из измерений численной концентрации в таком образце, можно получить оценку среднего размера частиц (формула 1).

$$M_1 = \frac{c_m}{c_N}; \quad M_1 = \rho \frac{4}{3} \pi R^3; \quad R = \sqrt[3]{\frac{3c_m}{4c_N \pi \rho}} \quad (1)$$

Где M_1 – масса одной частицы, c_m и c_N – массовая и численная концентрация частиц в образце соответственно, ρ – плотность материала наночастиц, R – средний радиус частиц.

В работе проведены исследования водных растворов наночастиц (НЧ) золота (32 нм) и раствора наночастиц SiO₂ в воде (100 нм и 200 нм). Для всех образцов измерены размеры наночастиц методами ультрамикроскопии [1] и динамического рассеяния света (ДРС). Для наночастиц SiO₂ размеры частиц дополнительно определены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Показано хорошее совпадение результатов измерений двумя различными методами для образцов коллоидного золота. Для наночастиц SiO₂ измерения размера частиц методом ультрамикроскопии при табличных значениях плотности не дает результата схожего с ДРС и СЭМ. Только при плотности существенно ниже табличной для такого образца можно получить результат методом ультрамикроскопии, сравнимый с результатами, полученными другими методами. Можно предположить, что НЧ SiO₂ имеют пористую структуру, и плотность таких частиц отличается от табличного значения плотности SiO₂. Можно предположить, что метод ультрамикроскопии позволяет в таких случаях получить оценку плотности наночастиц.

1 Описание метода ультрамикроскопии: [сайт]. URL: <http://npcounter.ru/> (дата обращения: 01.06.2025).

ОБРАТНЫЕ ЭМУЛЬСИИ ПИКЕРИНГА, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА ЦИНКА С ПОКРЫТИЯМИ ИЗ КАПРИЛИЛМЕТИКОНА И ЦИКЛОПЕНТОСИЛОКСАНА

Золототрубова А.А., Королёва М.Ю.

Научный руководитель – д.х.н., профессор Королёва М.Ю.

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

zlttrbv@gmail.com

Для стабилизации обратных эмульсий традиционно используют ПАВ [1, 2] и твёрдые частицы [3-5], образующие адсорбционный слой на поверхности капель внутренней фазы. Параметры адсорбционного слоя (толщина, плотность упаковки в нем наночастиц и пр.) определяют устойчивость дисперсной системы к процессам флокуляции и коалесценции.

Наночастицы оксида цинка с различными покрытиями нашли применение в косметической индустрии в качестве UV-фильтров в солнцезащитных косметических средствах. Уменьшение характерных размеров используемых частиц повышает эффективность рассеивания света, а, следовательно, повышает защитный фактор готового продукта, и улучшает ряд потребительских характеристик системы. Так, известно, что использование наноразмерных UV-фильтров способствует лучшему распределению частиц на коже и предотвращает нежелательные оптические эффекты от использования солнцезащитной продукции [6]. Благодаря своим размерам, изучаемые частицы, помимо солнцезащитной функции, способны обеспечить стабильность дисперсной системы. Подобное multifunctional применение описано в литературе [6, 7], но пока не заняло свою нишу в производственной практике косметических производств в виду ограниченности научных и практических данных.

В данной работе были изучены обратные эмульсии, стабилизированные наночастицами оксида цинка с гидрофобными покрытиями из каприлилметикона и циклопентосилоксана. Было изучено влияние доли частиц и ПАВ в системе на стабильность образующихся эмульсий.

Для получения эмульсий были использованы следующие реактивы: оксид цинка с покрытием из каприлилметикона (ООО «Найнтех», Россия), оксид цинка с покрытием из циклопентосилоксана (ООО «Найнтех», Россия), вазелиновое масло (Merkur WOP 120 PB, Merkur), Span 80 (моносorbitанолат) (95%, Sigma-Aldrich), NaCl (Химмед, ХЧ), дистиллированная вода. В качестве водной фазы использовался 0,15 М водный раствор NaCl. Концентрация водной фазы в эмульсиях составляла 70 об.%. Концентрация ПАВ – моносorbitанолата – составляла от 0 до 0,001 М. Концентрация частиц оксида цинка варьировалась от 1 до 10 мас. % относительно доли дисперсной среды.

Исследуемые эмульсии получали следующим образом: в предварительно изготовленную методом высокоскоростного перемешивания суспензию наночастиц и ПАВ в выбранном масле добавляли требуемый объем водного раствора хлорида натрия со скоростью 0,3 мл/мин при перемешивании со скоростью 1200 об/мин.

В данном исследовании особое внимание было уделено влиянию концентрации ПАВ в системе на стабильность получаемых эмульсий. Долю отслоившейся водной фазы фиксировали через 6 нед. хранения эмульсий при нормальных условиях (рис. 1). При концентрации ПАВ 0,0005 М в системах, содержащих в качестве масляной фазы вазелиновое масло и стабилизированных наночастицами оксида цинка с покрытием из каприлилметикона с концентрацией 3-9 мас.%, не происходит видимого отслаивания водной фазы. При этом, в эмульсии, содержащей 6 мас. % наночастиц, не отмечено видимого отслаивания водной фазы даже при отсутствии ПАВ.

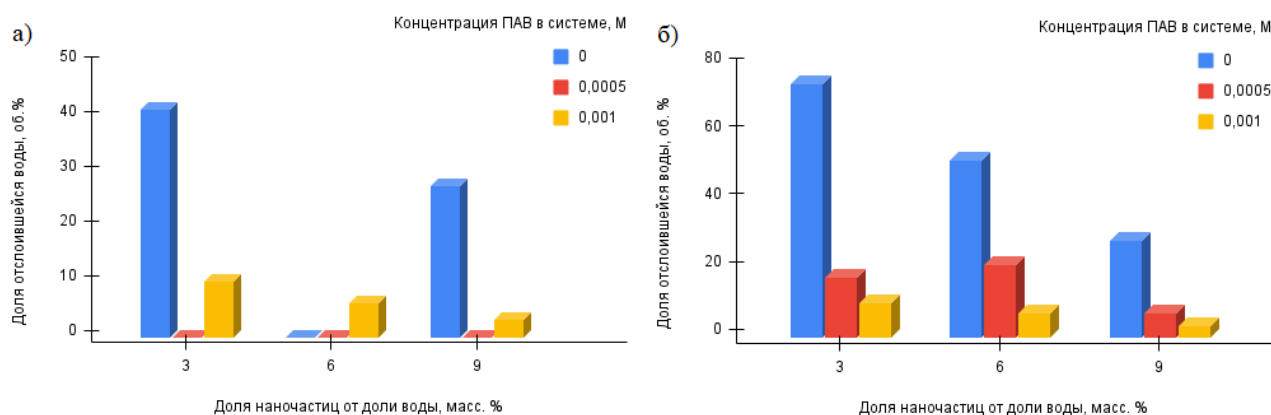


Рисунок 1 – Доля отслоившейся водной фазы в эмульсиях, содержащих в качестве масляной фазы вазелиновое масло, стабилизированных наночастицами оксида цинка с покрытием из: а) каприлилметикона; б) циклопентосилоксана.

В эмульсиях, стабилизированных наночастицами оксида цинка с покрытием из циклопентосилоксана во всех случаях наблюдали отслаивание водной фазы через 6 нед. хранения при нормальных условиях. Отметим, что скорость расслаивания была различной в системах с разным содержанием наночастиц – чем выше было содержание наночастиц оксида цинка в системе, тем она была стабильнее. Более того, в эмульсиях, содержащих 3 мас. % от доли водной фазы частиц оксида цинка, а также 0 М и 0,0005 М моносорбитанолеата, при хранении наблюдалось выпадение осадка. В эмульсиях, стабилизированных наночастицами с покрытием из циклопентосилоксана не наблюдалось скачкообразного изменения влияния ПАВ на стабильность системы – увеличение доли ПАВ положительно сказывалось на стабильности эмульсий.

Таким образом показано, что для практического применения наибольший интерес представляют наночастицы оксида цинка с покрытием из каприлилметикона в качестве стабилизатора солнцезащитных эмульсий. Исследованные наночастицы, модифицированные моносорбитанолеатом в низких концентрациях, эффективно снижают скорость ограниченной коалесценции в эмульсиях Пикеринга.

1. Koroleva M.Y., Shcherbakov V.A., Khasanova L.K., Rakitin A.I., Shirokikh S.A., Yurtov E.V. The stability of highly concentrated water-in-oil emulsions and structure of highly porous polystyrene produced from them // *Colloid J.*–2018. –V. 80(3). –P. 272-281.
2. Koroleva M., Tokarev A., Yurtov E. Simulation of flocculation in w/o emulsions and experimental study // *Colloids Surf., A.*–2015. –V. 481. –P. 237-243.
3. Koroleva M.Yu., Yurtov E.V. Pickering emulsions: structure, properties and the use as colloidosomes and stimuli-responsive emulsions. // *Russian Chem. Rev.* – 2022. –V. 91(5). –RCR5024.
4. Koroleva M.Yu., Yurtov E.V. Pickering emulsions stabilized with magnetite, gold, and silica nanoparticles: mathematical modeling and experimental study // *Colloids Surf., A.*–2020. –V. 601. –125001.
5. Koroleva M.Y., Tokarev A.M., Yurtov E.V. Simulations of emulsion stabilization by silica nanoparticles // *Mendelev Commun.*– 2017. –V. 27(5). – P. 518-520.
6. Peito S., Peixoto D., Ferreira-Faria I., Martins A.M., Ribeiro H.M., Veiga F., Marto J., Paiva-Santos A.C. Nano- and microparticle-stabilized Pickering emulsions designed for topical therapeutics and cosmetic applications // *J. Pharm.*–2022. - V. 615. - 121455.
7. Bordes C., Bolzinger M.A., El Achak M., Pirot F., Arquier D., Agusti G., Chevalier Y. Formulation of Pickering emulsions for the development of surfactant-free sunscreen creams // *J. Cosmetic Sci.* –2021. - V. 43(4). - P.432-445.

ВЫСВОБОЖДЕНИЕ ИМПРЕГНИРОВАННЫХ НАНОЭМУЛЬСИЙ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ ИЗ АЛЬГИНАТНОЙ МАТРИЦЫ

Гончарова Н.И., Мармура А.В., Белозёрова Е.В., Королёва М. Ю.

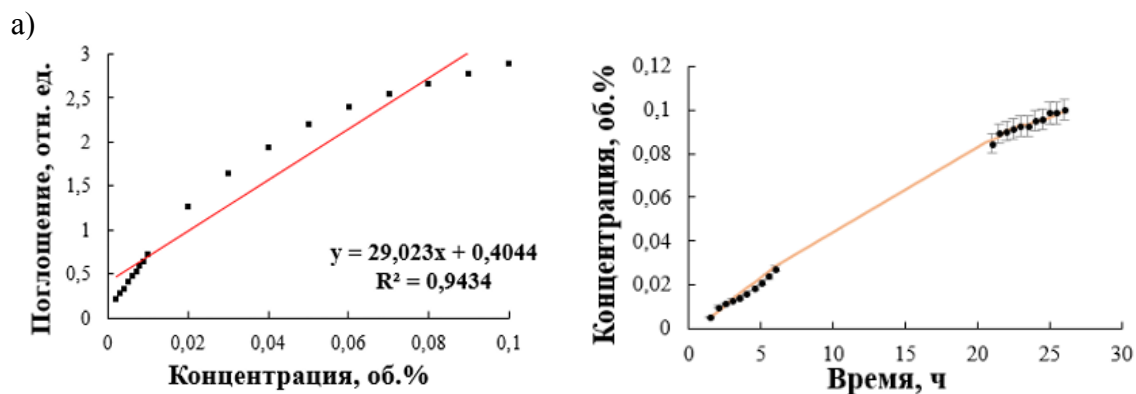
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

belozeroва.e.v@muctr.ru

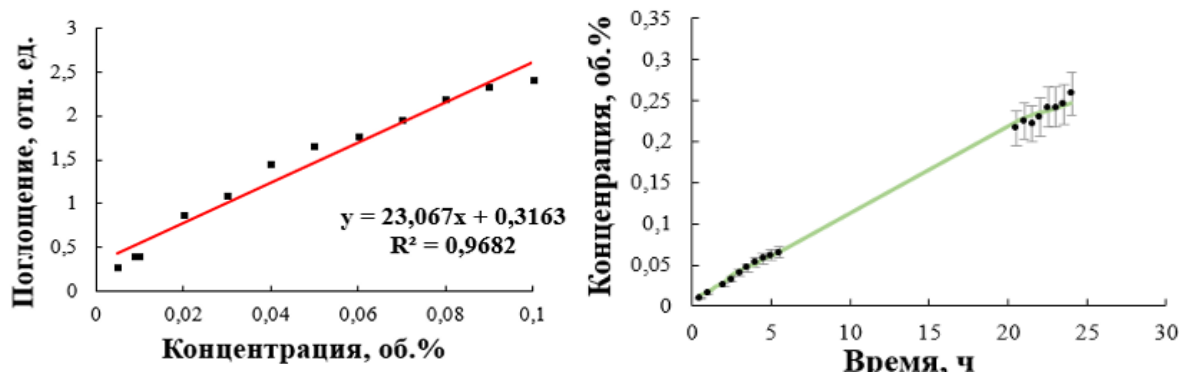
В настоящее время активно разрабатываются наноразмерные системы для доставки лекарственных веществ, так как они способствуют увеличению биодоступности инкапсулируемых компонентов. Наноземульсии (НЭ) представляют собой перспективные носители маслорастворимых соединений, предназначенных для трансдермальной доставки, поскольку мелкий размер капель способствует более глубокому и быстрому их проникновению через клеточные барьеры [1-3]. Инкапсуляция лекарственных средств в гидрогели, созданные на основе альгината натрия (АН), обеспечивает контроль над процессом высвобождения активных веществ в контакте «наноземульсия – кожный покров». В работе были изготовлены альгинатные пластыри с импрегнированной НЭ из масел облепихи, зародышей пшеницы и виноградной косточки.

Для получения НЭ смесь масла, Tween 60, Span 60 и водного раствора NaCl помещали в нагретый выше температуры плавления ингредиентов термостат, а далее охлаждали на ледяной бане при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке. Размер капель полученных НЭ был определен методом динамического светорассеяния (ZetaSizer Nano ZS Malvern Великобритания), он варьировался от 10 до 17 нм. Для получения альгинатных пластырей готовили водные растворы АН (к навеске АН приливали 10 мл раствора 37 об.% НЭ и добавляли бидистиллированную воду так, чтобы итоговая концентрация НЭ в пластыре составляла 18,5 об.%) затем смешивали их в соотношении 8:2 (концентрация АН 2 мас.%, CaCl_2 , 1,2 мас.% в конечном пластыре). Предварительно приготовленные растворы АН перемешивали в течение 2 часов, далее перемещали в чашку Петри и равномерно по окружности распыляли половину раствора CaCl_2 , переворачивали и выливали оставшуюся часть. Это способствовало двухсторонней ионной гелеобразующей реакции между компонентами для кальциевой сшивки АН. Готовые альгинатные пластыри представляли собой диски диаметром 6-8 см и высотой 0,3-0,6 см.

Высвобождение импрегнированных наноземульсий из альгинатной матрицы изучалось следующим образом: в 0,15М р-р NaCl нагретый до 37 °С помещались образцы альгинатных пластырей и фиксировались внутри колбы с помощью держателя, который обеспечивал равномерное погружение и исключал контакт образцов с дном сосуда. Высвобождение изучалось при постоянном перемешивании со скоростью 300 об/мин, а температура поддерживалась с помощью термопары. Через установленные временные интервалы (каждые 30 минут) отбирались аликвоты раствора для последующего анализа с помощью спектрофотометрического метода (Cary 50 Varian, США). Для определения концентрации высвободившейся НЭ из альгинатной матрицы от времени были получены концентрационные кривые, представленные на Рис. 1 слева.



б)



в)

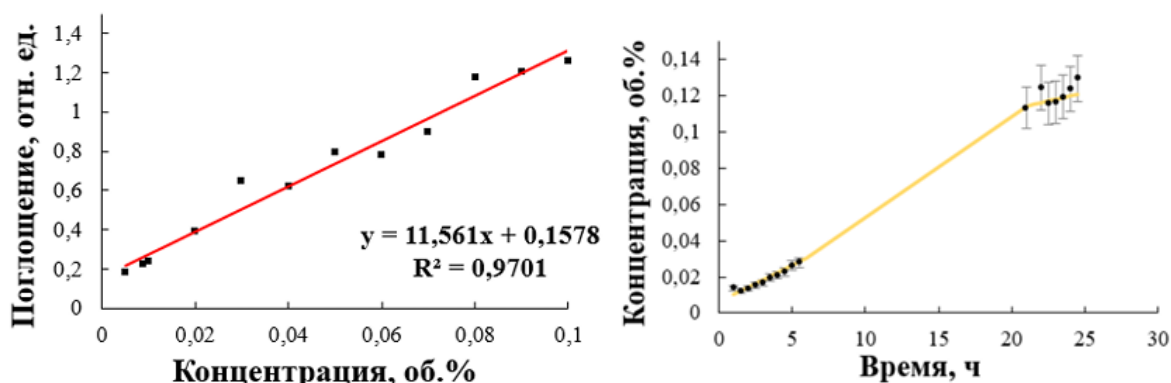


Рисунок 1 – Концентрационные кривые (слева) и высвобождение НЭ из альгинатного пластыря (справа) для дисперсной фазы из масла (а) облепихи, (б) виноградной косточки, (в) зародышей пшеницы

К 24 часам концентрация высвободившейся НЭ с дисперсной фазой из масла облепихи, см. Рис.1 составила 0,1 об.%, из масла виноградной косточки – 0,26%, из масла зародышей пшеницы – 0,12% что составляет 0,54%, 1,41% и 0,65% от всего объема добавленной НЭ соответственно.

Высвобождение НЭ из импрегнированных альгинатных пластырей происходило постепенно, обеспечивая пролонгированный выход оставшихся нанокapель в течение длительного времени. Различные скорости объясняются различными составами масел в НЭ. Полярные вещества в маслах (фосфолипиды, гидроксильные группы жирных кислот) могут выстраиваться на межфазном слое и влиять на взаимодействие с альгинатной матрицей. Более полярные масла, такие как масло облепихи, могут медленнее высвобождаться из полимерной матрицы из-за значительного содержания фосфолипидов, каротиноидов, витаминов и насыщенных и ненасыщенных жирных кислот с гидроксильными группами, что увеличивает их гидрофильность и связь с альгинатной матрицей.

- 1 Ivanova Ya.O., Kostromicheva M.M., Voronina K.L., Koroleva M.Yu. Properties of the nanoemulsions with seed oils // Int. J. Nanotechnol. 2024. V. 21. P. 49-58
- 2 Mishchenko E.V., Timofeeva E.E., Artamonov A.S., Portnaya I.B., Koroleva M.Yu Nanoemulsions and Nanocapsules with Oleic Acid // Colloid Journal. 2022. V. 84. P. 64-70
- 3 Mirgorodskaya A. B., Koroleva M. Yu., Kushnazarova R. A., Mishchenko E. V., Petrov K. A., Lenina O. A., Vyshtakalyuk A. B., Voloshina A. D., Zakharova L.Ya. Microemulsions and nanoemulsions modified with cationic surfactants for improving the solubility and therapeutic efficacy of loaded drug indomethacin // Nanotechnology. 2022. V.33. P. 1-28

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ГИБРИДНОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА rGO/НАНОКРИСТАЛЛ

Абдуллина А.Р.¹, Гунбина Е.В.², Егорова А.О.³, Чистилина А.А.⁴

Научный руководитель – к.х.н., Суркова А.А.⁵

¹ Гимназия №406, г. Санкт-Петербург

² Аничков лицей, г. Санкт-Петербург

³ ГФМЛ 30, г. Санкт-Петербург

⁴ Лицей №69, г. Краснодар

⁵ МНОЦ Физики наноструктур, университет ИТМО, Санкт-Петербург

aasurkova@itmo.ru

Современные технологии газовой сенсорики играют важную роль в различных областях, включая экологический мониторинг, промышленную безопасность и медицинскую диагностику. Особый интерес представляют сенсоры, способные детектировать летучие органические соединения (ЛОС) в предельно малых концентрациях [1]. В этом контексте особый интерес представляют гибридные наноструктуры на основе восстановленного оксида графена (rGO) и нанокристаллов. В дополнение к высокой чувствительности, возникающей благодаря использованию rGO, данные сенсоры способны демонстрировать селективность по отношению к ряду ЛОС.

Применение гибридных наноструктур rGO/нанокристалл достаточно хорошо изучено в фотовольтаике [2], где установлено существование процессов переноса энергии и заряда для данных структур. Однако применение подобных структур для газовых сенсоров на данный момент по-прежнему остаётся достаточно новым направлением исследований [3]. Особенно остро ощущается недостаток исследований влияния процессов переноса заряда/энергии между компонентами гибридной структуры на отклик газовых сенсоров, понимание особенностей которых является основой создания гибридных структур с заданными свойствами.

Целью данной работы является установление существования возникающих в гибридных структурах размеро-зависимых эффектов, связанных с используемым нанокристаллом.

Для создания рассматриваемых в работе гибридных структур были использованы безбололочные квантовые точки (КТ) CdTe двух размеров. Расчёт размера КТ производился по формуле, приводимой в работе [4]:

$$D = (9,8127 \times 10^{-7})\lambda^3 - (1,7147 \times 10^{-3})\lambda^2 + (1,0064)\lambda - 194,84, \quad (1)$$

где λ - положение первого максимума экситонного поглощения в спектрах квантовых точек (нм). Спектры поглощения квантовых точек были зарегистрированы для КТ растворов в толуоле. Спектроскопическая погрешность определения положения максимума лежит в пределах ± 3 нм, что в совокупности с доверительным интервалом для представленных в работе [4] аппроксимирующих функций даёт неопределенность измерения диаметра КТ $\pm 0,60$ нм. Диаметр использованных в работе квантовых точек теллурида кадмия составил $3,35 \pm 0,60$ нм ($\lambda = 561 \pm 3$ нм) и $4,20 \pm 0,60$ нм ($\lambda = 643 \pm 3$ нм).

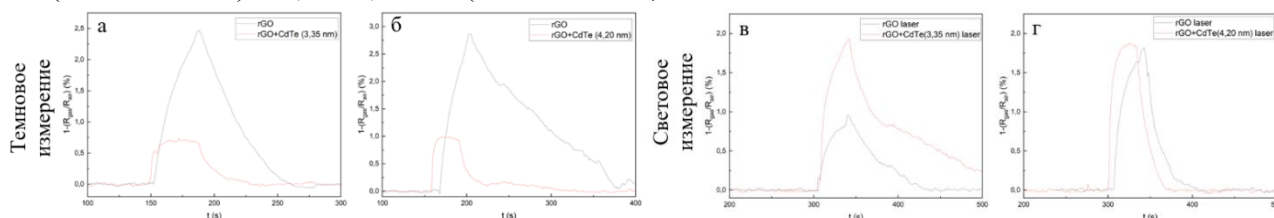


Рисунок 1 – Относительные отклики газовых сенсоров rGO (черная линия) и rGO/КТ (красная линия): а – темновое измерение для КТ 3,35 нм, б – темновое измерение для КТ 4,20 нм, в – световое измерение для КТ 3,35 нм, г – световое измерение для КТ 4,20 нм.

Чувствительный элемент газового сенсора на основе rGO создавался посредством дроб-кастинга раствора на диэлектрические подложки с ИТО электродами (Ossila). Сопротивление

полученных структур находилось в пределах 4 ± 1 кОм. Создание гибридных структур rGO/КТ производилось посредством дроб-кастинга растворов квантовых точек на ранее изготовленные сенсоры.

Относительная амплитуда откликов (рис. 1) для rGO и гибридных структур была измерена в двух режимах: темновом (без воздействия лазерного излучения) и световом (с воздействием лазерного излучения на образец, $\lambda = 405 \pm 5$ нм, $P = 20 \pm 1$ мВт/см²). Расчёт относительной амплитуды отклика производился по формуле 2:

$$\text{Relative response (\%)} = 1 - \left(\frac{R_{gas}}{R_{air}} \right), \quad (2)$$

где R_{air} - сопротивление газового сенсора на воздухе, R_{gas} - сопротивление газового сенсора при подаче газа. Для обоих образцов было отмечено снижение амплитуды темнового отклика при одновременном увеличении амплитуды светового. Данное обстоятельство указывает на существование переноса энергии/заряда между компонентами композитного сенсора.

Изменение соотношения амплитуды относительного темнового отклика имеет явную зависимость от размера используемых при создании гибридной наноструктуры квантовых точек. Так, для КТ диаметром $3,35 \pm 0,60$ нм изменение составило 6,76 раз, а для КТ диаметром $4,20 \pm 0,60$ нм - 2,97 раз.

В рамках работы было проведено создание газового сенсора на основе гибридных наноструктур rGO/КТ. Посредством электрических и спектроскопических измерений были охарактеризованы используемые в работе КТ и полученные rGO, rGO/КТ сенсоры. Было установлено существование зависимости изменения соотношений амплитуды темнового/светового откликов при создании гибридной структуры от размера наносимых квантовых точек.

1. Some S. et al. Highly Sensitive and Selective Gas Sensor Using Hydrophilic and Hydrophobic Graphenes // Scientific Reports. – 2013. – V. 3, № 1. – P. 1868.
2. Lightcap I.V., Kamat P.V. Fortification of CdSe Quantum Dots with Graphene Oxide. Excited State Interactions and Light Energy Conversion // Journal of American Chemical Society. – 2012. – V. 134, № 16. – P. 7109–7116.
3. Motora K.G. et al. Highly efficient and stable NiSe₂-rGO composite-based room temperature hydrogen gas sensor // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – V. 50. – P. 1174–1183.
4. Yu W.W. et al. Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals // Chemistry of Materials. – 2003. – V. 15, № 14. – P. 2854–2860.

НАНОКОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОЙ МЕМБРАНЫ И ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЛОС

Морина А.И.¹, Булаич М.Г.¹, Бакин Ф.К.¹, Захаров В.В.², Ковова М.С.²

Научный руководитель – Ковова М.С.

¹ ГБОУ лицей № 150 Калининского района Санкт-Петербурга

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

annamorina109@gmail.com

По данным Министерства здравоохранения Российской Федерации количество обнаруженных злокачественных новообразований растет на 5% каждый год, а по смертности первое место в мире занимает рак легких [1]. Существующие на данный момент методы выявления заболеваний несовершенны, так как наиболее точны преимущественно на поздних стадиях [2], а также это инвазивные методы потенциально опасные для здоровья. Для обнаружения заболеваний на ранних стадиях необходима разработка сенсорных систем, позволяющих фиксировать биомаркеры рака в биологических жидкостях человека или выдыхаемом воздухе. Биомаркерами выступают летучие органические соединения (ЛОС), повышение концентрации которых сигнализирует о начале болезни [3]. Одним из видов наноструктур, перспективных для использования в сенсорике, являются квантовые точки (КТ). Высокая фотостабильность [4, 5] квантовых точек повышает точность и надежность их детекции, а настраиваемая химия поверхности позволяет повысить селективность обнаружения специфических биомаркеров [6]. Отдельный интерес вызывает использование гибридных наноконпозитов на основе квантовых точек и пористых трековых мембран (ТМ) [7, 8], которые вместе создают высокочувствительную специфическую платформу для обнаружения ЛОС. Не меньшего внимания заслуживают нанопластины (НП), которые представляют собой нанокристаллические материалы с толщиной в несколько монослоев. НП обладают хорошо контролируемыми оптическими свойствами, большой площадью поверхности и высокой чувствительностью к внешним воздействиям [9]. Возможность использования наноконпозита на основе пористой мембраны и люминесцирующих наночастиц в качестве компонента сенсора на ЛОС была рассмотрена в данной работе.

В работе была использована полиэтилентерефталатная пористая мембрана с диаметром пор 3 мкм, расположенных под углом 43°, квантовые точки CdTe и нанопластины CdSe. Был создан наноконпозит на основе пористой мембраны с КТ CdTe и исследовано распределение квантовых точек в порах путем создания трехмерного люминесцентного изображения наноконпозита (рисунок 1) с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа. Исследовано влияние ацетонитрила на оптические свойства наноконпозита.

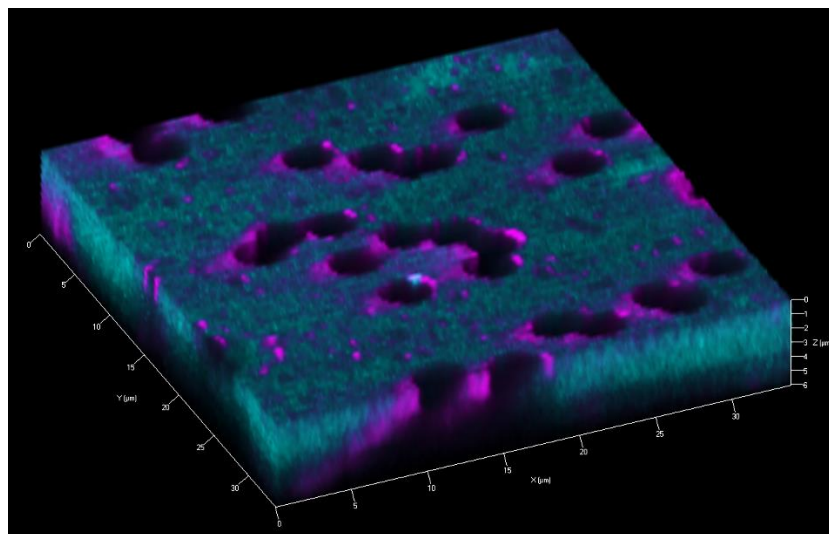


Рисунок 1 - 3D люминесцентное изображение НК с КТ CdTe при возбуждении на длине волны 405 нм

В работе также был создан нанокомпозит на основе пористой мембраны с зелеными (максимум полосы люминесценции приходится на 515 нм) и красными (максимум полосы люминесценции приходится на 615 нм) нанопластинами CdSe. Распределение НП в порах было изучено с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа. Было исследовано влияние бутанола-1 на свойства нанокомпозита с двумя видами НП.

Таким образом, было создано несколько нанокомпозитов с различными наночастицами, внедренными в приповерхностный слой пор мембраны, и исследовано влияние ацетонитрила и бутанола-1 на их оптические свойства. При взаимодействии с ацетонитрилом наблюдалось увеличение интенсивности люминесценции КТ CdTe, а при взаимодействии с парами бутанола-1 тушение люминесценции красных НП CdSe и увеличение интенсивности люминесценции зеленых НП CdSe. Был сделан вывод, что такие нанокомпозиты перспективны для использования в качестве компонента сенсора на ЛОС.

1 Г.А. Александрова, Р.Р. Ахметзянова, Н.А. Голубев, Г.Н. Кириллова, Е.В. Огрызко, Ю.И. Оськов, О.И. Романенко, Т.Л. Харькова, В.Ж. Чумарина *Здравоохранение в России*. 2023: Стат.сб. — Росстат.-М. — 2023. —с. 179.

2 Zafar M., Arnous M., Nwankwo N., Reddy A. Analysis of diagnosis patterns and implications on cancer stage in patients with lung cancer: A single-institution experience. // *Journal of Clinical Oncology*. — 2024. — V. 42. — P. e22508-e22508.

3 Moura P.C., Raposo M., Vassilenko V. Breath volatile organic compounds (VOCs) as biomarkers for the diagnosis of pathological conditions: A review // *Biomedical Journal*. — 2023. — V. 46. — № 4. — P. 100623.

4 Sapsford K.E., Pons T., Medintz I.L., Mattoussi H. Biosensing with Luminescent Semiconductor Quantum Dots // *Sensors*. — 2006. — V. 6. — № 8. — P. 925-953.

5 Michalet X., Pinaud F.F., Bentolila L.A., Tsay J.M., Doose S., Li J.J., Sundaresan G., Wu A.M., Gambhir S.S., Weiss S. Quantum Dots for Live Cells, in Vivo Imaging, and Diagnostics // *Science*. — 2005. — V. 307. — № 5709. — P. 538-544.

6 Kilina S.V., Tamukong P.K., Kilin D.S. Surface Chemistry of Semiconducting Quantum Dots: Theoretical Perspectives // *Accounts of Chemical Research*. — 2016. — V. 49. — № 10. — P. 2127-2135.

7 Mashentseva A.A., Sutekin D.S., Rakisheva S.R., Barsbay M. Composite Track-Etched Membranes: Synthesis and Multifaced Applications // *Polymers*. — 2024. — V. 16.— № 18. — P. 2616.

8 Orlova A.O., Gromova Yu.A., Maslov V.G., Prudnikau A.V., Artemyev M.V., Fedorov A.V., Baranov A.V. Formation of structures based on semiconductor quantum dots and organic molecules in track pore membranes // *Journal of Applied Physics*. — 2013. — V. 113. — № 21. — P. 214305.

9 Bouet C., Tessier M.D., Ithurria S., Mahler B., Nadal B., Dubertret B. Flat Colloidal Semiconductor Nanoplatelets // *Chemistry of Materials*. — 2013. — V. 25. — № 8. — P. 1262-1271.

ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И ФОРМИРОВАНИИ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ СТРУКТУР

к.т.н., н.с. Жуков М.В.

Институт аналитического приборостроения Российской академии наук
cloudjyk@yandex.ru

В последние годы в области нанотехнологий получила широкое распространение биомиметика, или бионика, - область науки, изучающая живые организмы с целью применения их уникальных свойств в технических устройствах и процессах. Например, к биомиметическим структурам можно отнести регулярные выступы малых размеров на поверхности растений (лист лотоса, розы, таро и т.п.), на которых жидкость сворачивается в шарикообразные капли и скатывается с поверхности (самоочищающиеся супергидрофобные покрытия) [1]. Другим примером может служить структурная окраска некоторых насекомых, которая обеспечивается за счет наноструктур наподобие 3D-фотонных кристаллов (например, бабочки рода *Morpho*), или субмикронных частиц разного размера, рассеивающих свет (моль) [2]. Для высокоточного изучения и воспроизведения подобных структур необходимы методы, обеспечивающие разрешение микро- и нанометрового масштаба. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является одним из перспективных методов, поскольку позволяет не только исследовать сложные биомиметические структуры с высоким разрешением, но и формировать подобные им структуры (силовая литография) [3]. Также преимуществом технологии АСМ является возможность тонкой настройки параметров литографии и геометрии формируемых структур без необходимости использования сложных масок и фоторезистов.

Целью данной работы является развитие подходов изучения и воспроизведения сложных природных микро- и наноструктур с использованием технологии атомно-силовой микроскопии и литографии.

В качестве биомиметических структур были выбраны лепестки розы и структура крыла бабочки. Изучение структур проводилось на приборе NanoTutor (НТ-СПб) в полуконтактном режиме атомно-силовой микроскопии (АСМ). В качестве датчика использовалась пьезорезонансная трубка с закрепленным в ней W зондом. Для создания зондов использовался метод электрохимического травления W проволоки в мениске. Для контроля размеров и формы зондов применялся сканирующий электронный микроскоп Quanta Inspect (FEI). В качестве подложек для создания наноструктур были выбраны гладкие поверхности поликарбоната и глянцевая бумага. Создание структур выполнялось методом АСМ динамической литографии (наночеканка). Шаблоны структур создавались в программе прибора в соответствии с параметрами, измеренными с биомиметических структур.

Подобрана оптимальная форма зонда для точного измерения объектов (угол схождения $\sim 4-6^\circ$, длина заострения около 1-1,5 мм) и для обеспечения достаточной механической устойчивости в режиме литографии (угол схождения $\sim 10-20^\circ$, длина заострения около 0,3-0,4 мм), радиус скругления вершин зондов составлял около 50-100 нм. Изучена структура микровыступов и нанорельефа на лепестке розы, а также разные цветовые зоны на высушенном крыле бабочки. Проведена оценка сил, возникающих в процессе литографии при учете зоны контакта зонда с подложкой, выявлены оптимальные параметры силы и времени воздействия. Применена градиентная литография, позволяющая создавать сложные 3D-структуры на примере выступов, подобных наблюдаемым на лепестке розы. Изучены цветовые характеристики созданных пересекающихся дифракционных решеток разного периода, имитирующих структуру поверхности крыла бабочки. Размеры областей литографии составляли ~ 30 мкм с высотой структур до $\sim 1-2$ мкм. АСМ-данные обрабатывались и анализировались в программном обеспечении прибора и в мультиплатформенном приложении Gwyddion. Изучены геометрические параметры структур (высота, период, толщина и глубина борозд, и т.п.), изучены гистограммы высот, шероховатости, сегментация

объектов, изучены и устранены артефакты изображений, возникающие при сканировании объектов и в процессе литографии.

Таким образом, в работе показано, что метод атомно-силовой микроскопии и динамической литографии применим для высокоточного изучения и формирования биомиметических структур заданной геометрии на примере структур лепестков роз и крыльев бабочек. Приведены рекомендации к выбору формы и размера зондов, а также параметров сканирования и литографии нано- и микроразмерных структур.

1 Guo Z., Liu W. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure // *Plant Science*. – 2007. – V. 172. – P. 1103-1112.

2 Sun J., Bhushan B., Tong J. Structural coloration in nature // *Rsc Advances*. – 2013. – V. 3. – P. 14862-14889.

3 Alsteens, D., Gaub, H. E., Newton, R., Pfreundschuh, M., Gerber, C., Müller, D. J. Atomic force microscopy-based characterization and design of biointerfaces // *Nature Reviews Materials*. – 2017. – V. 2. – P. 1-16.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MUMAX3

Малкин А.Б., Палитова Г.А.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., Палитова Г.А.

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. БАЙКОВА РАН
voultbody@gmail.com

1. Постановка научной проблемы

Исследование магнитных свойств интерметаллидов (соединений переходных и редкоземельных металлов) имеет важное значение для разработки новых функциональных материалов, применяемых в спинтронике, магнитной записи и энергетике, медицине. Однако экспериментальное изучение их магнитной структуры и динамики требует значительных ресурсов. Компьютерное моделирование позволяет предсказывать магнитные характеристики, оптимизировать состав и структуру материалов, сокращая время и затраты на эксперименты.

2. Анализ существующего положения и обзор опыта

Экспериментальные методы (рентгеновская дифракция, магнитометрия) дают точные данные, но требуют синтеза образцов и сложного оборудования. Доступны вычислительные подходы: отечественные исследования с использованием пакетов OOMMF и SpinPM для микромагнитного моделирования, но с ограниченной поддержкой GPU-ускорения. Зарубежный опыт: широкое применение MuMax3 (на основе метода конечных разностей) для моделирования наногетероструктур благодаря высокой скорости расчетов на видеокартах.

3. Предлагаемое решение

В работе исследуется возможность применения MuMax3 для моделирования магнитных свойств интерметаллидов. Преимущества подхода:

- Учет обменного взаимодействия, магнитной анизотропии и внешних полей.
- Визуализация доменной структуры и гистерезисных петель (примеры на Рис. 1).
- Оптимизация параметров модели (размер сетки, граничные условия) для точного описания реальных материалов.

4. Ожидаемые результаты и новизна

- Разработка параметризованных моделей для интерметаллидов.
- Сравнение с экспериментальными данными (например, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила).
- Предложение экономичного метода скрининга перспективных составов перед синтезом.

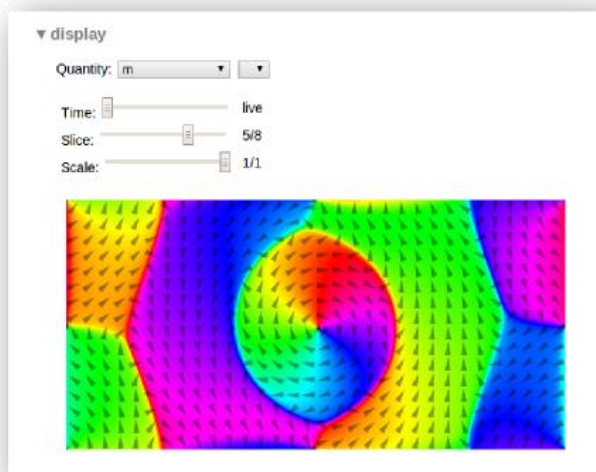


Рисунок 1 – Спиральная магнитизация

5. Основные выводы

1. MuMax3 эффективен для моделирования сложных магнитных систем, включая интерметаллиды.
2. Подход снижает затраты на предварительные исследования.
3. Дальнейшее развитие требует учета температурных эффектов и многофазности материалов.

Перспективы: Интеграция с методами машинного обучения для ускорения поиска оптимальных магнитных характеристик.

1. Дубенко И. С., Звездин А. К., Лагутин А. С., Левитин Р. З., Маркосян А. С., Платонов В. В., Таценко О. М. Исследование метамагнитных переходов в зонной d-подсистеме интерметаллидов RCo_2 в сверхсильных магнитных полях до 300 Тл // Письма в ЖЭТФ. — 1996. — Т. 64, вып. 3. — С. 188–192.
2. Соколовский В. В., Загребин М. А., Бучельников В. Д., Марченков В. В. Современные магнитокалорические материалы: существующие проблемы и перспективы исследований // ФММ. — 2023. — Т. 124, № 11. — С. 1019–1024.
3. Chzhan V. B., Tereshina I. S., Karpenkov A. Y., Tereshina-Chitrova E. A. Persistent values of magnetocaloric effect in the multicomponent Laves phase compounds with varied composition // Acta Materialia. — 2018. — Vol. 154. — P. 303–310.

НАНОКОМПОЗИТЫ С $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$: СИНЕРГИЯ МАГНИТОСТРИКЦИИ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВА ДЛЯ МУЛЬТИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Ага-Тагиева С.Э.

Научный руководитель – к.х.н. Кладько Д.В.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

agatagiyewas@gmail.ru

Магнитоэлектрические (МЭ) мультиферроичные материалы, которые одновременно проявляют сегнетоэлектричество и ферромагнетизм, в последнее время вызывают растущий интерес к их значительному потенциальному применению в новых multifunctional устройствах. Современные исследования в области магнитоэлектрических мультиферроичных материалов сосредоточены на преодолении ключевого ограничения однофазных систем - низкого коэффициента магнитоэлектрической связи при температурах выше комнатной. Многофазные композиты, особенно с архитектурой "ядро-оболочка", демонстрируют принципиально новые возможности за счет синергетического взаимодействия ферромагнитных и сегнетоэлектрических фаз. В таких системах, как $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$, удастся минимизировать проблемы межфазных границ и теплового расширения, характерные для традиционных композитов [1-4].

Однако одна из основных проблем заключается в изучении различных параметров таких систем. Однако, несмотря на обширные исследования влияния объемной доли (соотношения фаз) на магнитоэлектрическую связь в композитах "ядро-оболочка", вопрос о том, как на эту связь влияет размер ферромагнитного ядра (например, диаметр частиц CoFe_2O_4), остается практически не изученным. Таким образом, комплексное изучение влияния размера ядра на микроструктуру и свойства представляет собой важнейшее направление современных исследований в данной области.

В ходе исследования особое внимание было уделено изучению влияния стехиометрического соотношения компонентов в системе $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$ на функциональные свойства композита. Были синтезированы и детально исследованы образцы с различными соотношениями фаз (1:1, 1:2 и 2:1), что позволило выявить четкую зависимость магнитных характеристик от состава материала. На см. Рис. 1 представлены ключевые результаты исследования магнитоэлектрических свойств нанокompозитов $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$. На графике Рис. 1 (а) показана петля гистерезиса чистого CoFe_2O_4 , демонстрирующая типичное ферромагнитное поведение с высокой намагниченностью насыщения ($52 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$) и умеренной коэрцитивной силой (136.9 мТ). График Рис. 1 (б) показал, что введение сегнетоэлектрической оболочки BaTiO_3 приводит к значительному снижению намагниченности насыщения (от $52 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ для чистого CoFe_2O_4 до $5\text{-}15 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ для композитов), что объясняется разбавлением магнитной фазы и образованием межфазного слоя. Результаты пьезоэлектрических измерений Рис. 1 (в) подтверждают наличие выраженного магнитоэлектрического эффекта, особенно для состава 1:1, который демонстрирует наиболее эффективное преобразование энергии. Зависимость намагниченности от содержания BaTiO_3 Рис. 1 (г) имеет нелинейный характер с резким снижением магнитных свойств при превышении 50% содержания сегнетоэлектрической фазы. Полученные данные подчеркивают ключевую роль стехиометрического соотношения компонентов в формировании функциональных свойств композитов и их перспективность для создания гибких магнитоэлектрических устройств.

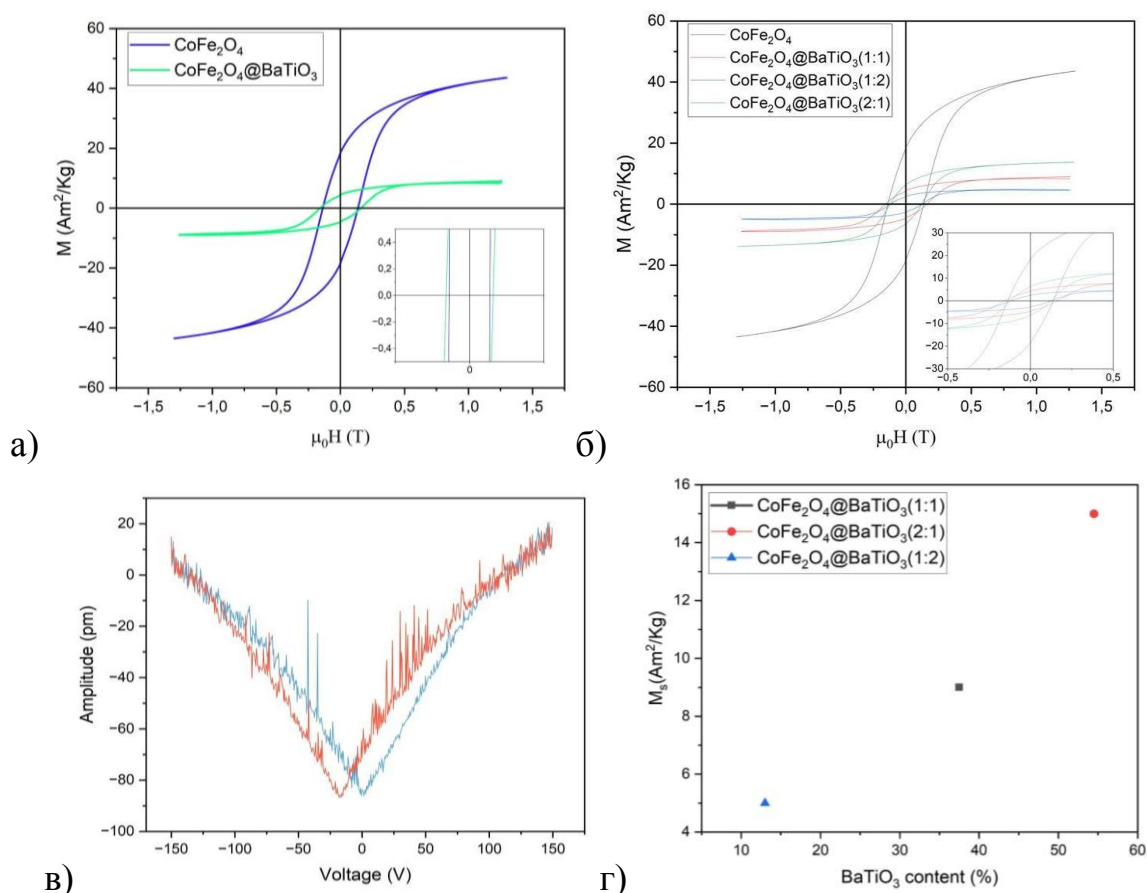


Рисунок 1 –Петли гистерезиса нанокompозитов типа "ядро-оболочка"
 а) $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$, б) $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$ с различными соотношениями компонентов (1:1, 1:2 и 2:1), в) Петли гистерезиса ПФМ $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$, г) Изменение намагниченности насыщения в системе $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$ при вариации содержания титаната бария

Проведенное исследование продемонстрировало успешный синтез и комплексную характеристику магнитоэлектрических нанокompозитов $\text{CoFe}_2\text{O}_4@ \text{BaTiO}_3$, обладающих уникальным сочетанием функциональных свойств. Ключевым достижением стало установление взаимосвязи между стехиометрическим составом, структурой и магнитоэлектрическими характеристиками материала. Наибольший интерес представляет композит с соотношением компонентов 1:1, который продемонстрировал оптимальный баланс магнитных ($\mu_0 H_C = 158$ мТ) и пьезоэлектрических свойств благодаря синергии ферромагнитного ядра и сегнетоэлектрической оболочки. Полученные результаты подтверждают перспективность таких материалов для создания гибких устройств нового поколения, включая носимые датчики, энергогенерирующие системы и элементы IoT-устройств, где критически важны компактность, эффективность преобразования энергии и механическая гибкость. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию масштабируемости технологии и интеграции композитов в реальные функциональные устройства.

1. Wang, Y.; Gray, D.; Berry, D.; Gao, J.; Li, M.; Li, J.; Viehland, D. An Extremely Low Equivalent Magnetic Noise Magnetolectric Sensor. *Adv. Mater.* 2011, 23, 4111–4114.
2. Zhai, J.; Xing, Z.; Dong, S.; Li, J.; Viehland, D. Detection of Pico-Tesla Magnetic Fields Using Magneto-Electric Sensors at Room Temperature. *Appl. Phys. Lett.* 2006, 88, 062510.
3. Shah, S. Multiferroics: Towards a Magnetolectric Memory Related Papers. *Nat. Mater.* 2008, 7, 425–426
4. Israel, C.; Kar-Narayan, S.; Mathur, N.D. Converse Magnetolectric Coupling in Multilayer Capacitors. *Appl. Phys. Lett.* 2008, 93, 173501.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ НАНОРАЗМЕРНОГО ДИОКСИДА ТИТАНА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗОЙ

Филиппов Д.Д., Рехман З.А., Серов А.М., Татов А.В., Голик Д.Б.

Научный руководитель – к.т.н. Нагдалян А.А.

Северо-Кавказский федеральный университет

dio_5@mail.ru

Наноразмерный диоксид титана (TiO_2) является перспективным материалом для использования в различных сферах жизни человечества. Так, данный материал широко применяется в медицине для отбеливания зубов и добавления к стоматологическим материалам для контроля образования биопленки в полости рта и изготовления зубных протезов [1]. Наноразмерный диоксид титана также применяют в строительстве. Например, для создания «умных» бетонов, содержащих наночастицы, которые реагируют на влажность или температуру, что обеспечивает дополнительную защиту от разрушения, для улучшения таких свойств строительных материалов, как пористость и прочность на сжатие и растяжение, для создания нанопокровов, способных разрушать органические загрязнения под действием солнечного света, что актуально в городских условиях. Кроме того, наноразмерный диоксид титана применяют в косметологии в солнцезащитных кремах из-за их способности блокировать ультрафиолетовое излучение, и в сельском хозяйстве в качестве нанопестицидов и нанодобавок [2].

Широкий спектр применений наноразмерного диоксида титана стал возможен благодаря его фотокаталитической активности, высокой реакционной способности, антимикробным, стимулирующим и другим свойствам [3]. Для улучшения вышеуказанных свойств наноразмерный диоксид титана стабилизируют биологически активными веществами. Одним из таких является метилцеллюлоза (МЦ) – это полимерный материал, широко используемый в качестве стабилизатора, загустителя и диспергирующего агента в различных химических и промышленных синтезах. МЦ предотвращает оседание твердых частиц и расслоение жидких фаз, создавая вязкую среду, в которой наночастицы равномерно распределены.

Таким образом, целью данной работы являлось синтезировать наноразмерный диоксид титана, стабилизированный МЦ, и исследовать морфологию поверхности данного материала.

Наноразмерный диоксид титана, стабилизированный МЦ, синтезировали методом осаждения. В качестве прекурсора титана использовали тетраизопропилат титана, в качестве растворителя – изопропиловый спирт, в качестве осадителя – гидрат аммиака, в качестве стабилизатора – МЦ. В растворитель добавляли прекурсор, после чего добавляли стабилизатор, массовая доля которого составляла 0,01 масс. %. Затем медленно по каплям вливали 12,5 %-ный водный раствор осадителя. После чего полученный раствор отмывали центрифугированием. Полученный осадок высушивали в сушильном шкафу до полного высыхания, после чего полученный порошок перетирали при помощи керамических пестика и ступки.

Полученный образец исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе *FEG SEM MIRA3 LMH* с катодом с полевой эмиссией с системой определения элементного состава *AZtecEnergy Standart / X-max 20 (standard)* фирмы *Tescan*. Микрофотография исследуемого образца представлена на рисунке 1.

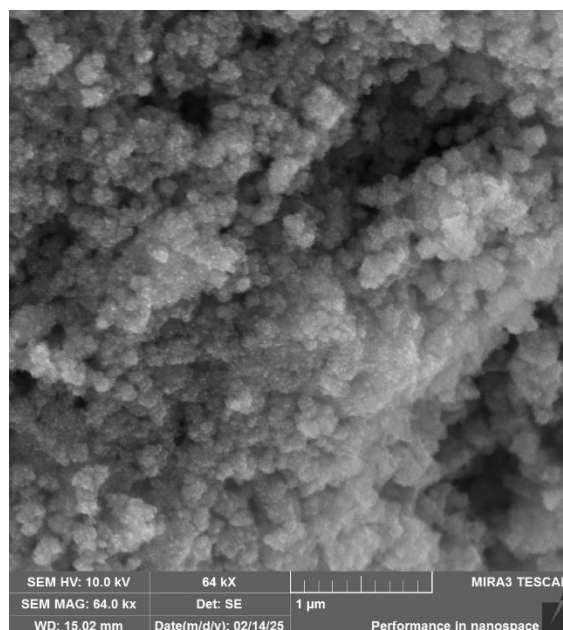


Рисунок 1 – СЭМ-микрофотография наноразмерного диоксида титана, стабилизированного МЦ

В результате анализа микрофотографии можно сделать вывод, что микроструктура исследуемого образца представлена агрегатами неправильной формы, состоящими из наночастиц сферической формы размерами от 50 до 200 нм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10046, <https://rscf.ru/en/project/23-76-10046/>.

1. Абдуллин И.Ш. и др. Нанодисперсные материалы на основе оксида титана в микробиологической, медицинской и пищевой промышленности // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15 (№ 10). – С. 158-165.
2. Ghareeb A. et al. Unlocking the potential of titanium dioxide nanoparticles: an insight into green synthesis, optimizations, characterizations, and multifunctional applications //Microbial Cell Factories. – 2024. – V. 23. (№ 1). – P. 341.
3. Марьева Е.А., Попова О.В. Электрохимическое модифицирование титана в водно-органических электролитах, 2016. – 152 с.

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ БАКТЕРИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УГНЕТАЮЩИХ ФАКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМИЗАЦИИ ДАННЫХ С АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Банков А.А.¹, Жуков М.В.²

Научный руководитель – к.т.н., н.с., Жуков М.В.

¹ Университет ИТМО

² Институт аналитического приборостроения Российской академии наук

bankov-04a@yandex.ru

Одной из ключевых задач современной микробиологии является разработка быстрых и высокоточных методов оценки антибиотикочувствительности бактерий. На фоне роста антибиотикорезистентности особенно актуальными становятся подходы, позволяющие фиксировать структурные и функциональные изменения бактериальных клеток на ранних стадиях воздействия препаратов [1]. В данной работе разработан алгоритм обработки изображений атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью применения методов сегментаций программы Gwyddion для оценки морфологических и наномеханических изменений бактериальных клеток под действием угнетающих факторов — этанола и ряда антибиотиков.

В качестве модельных объектов были выбраны непатогенные пробиотические бактерии *Lactobacillus plantarum* и *Lactobacillus fermentum*, а также условно-патогенный штамм *Escherichia coli* ATCC 25922 [2,3]. Влияние этанола исследовалось на лактобактериях, в то время как *E. coli* подвергалась воздействию амоксициллина, гентамицина и фосфомицина. Все антибиотики подбирались в концентрациях, соответствующих минимально ингибирующей концентрации (МИК), предварительно определенной методом Е-теста [4]. Сравнение с классическими фенотипическими методами позволило оценить преимущества и перспективы использования АСМ в диагностике антибиотикорезистентности.

С целью автоматизации анализа были протестированы различные методы сегментации АСМ-изображений: по порогу высоты — для изолированных клеток, и по алгоритму водораздела — для плотных скоплений бактерий. Маски, полученные в результате сегментации, использовались для расчёта геометрических параметров и оценки силы адгезии клеток к подложке.

В рамках работы была реализована оригинальная методика анализа АСМ-изображений, включающая сегментацию клеток и вычитание 3D-изображений одной и той же клетки до и после воздействия. Такой подход позволил не только оценивать изменения по длине и ширине клеток, но и регистрировать локальные трансформации рельефа поверхности, включая впадины, изменение высоты отдельных участков и потерю целостности оболочки. Это особенно важно в случае клеток неправильной формы, где классические методы анализа, основанные на усреднённых геометрических показателях, недостаточны.

По результатам эксперимента для лактобактерий было зафиксировано увеличение площади и объема клетки после обработки этанолом, а также снижение силы адгезии к подложке на 18%, что, вероятно, связано с разрушением поверхностных белков и пептидогликана. В случае *E. coli* при воздействии фосфомицина и гентамицина наблюдались существенные изменения: уменьшение размеров, снижение высоты клеток, выравнивание поверхности и резкое увеличение силы адгезии (до трёхкратного по сравнению с контролем). Такие изменения свидетельствуют о серьезной деструкции клеточной оболочки и подтверждают бактерицидное действие препаратов. Амоксициллин, в отличие от других антибиотиков, вызвал менее выраженные изменения, что может объясняться его механизмом действия и уровнем устойчивости штамма.

Сравнительный анализ с данными оптической микроскопии показал, что АСМ обладает более высокой точностью и информативностью. В частности, значения длины и ширины клеток, полученные с помощью АСМ, оказались ниже, чем по оптическим изображениям, что объясняется лучшим разрешением и возможностью точного выделения границ объектов.

Кроме того, только АСМ позволил оценить такие параметры, как высота клетки, шероховатость поверхности и сила адгезии, недоступные при традиционных методах.

Разработанная методика демонстрирует потенциал АСМ как экспресс-инструмента диагностики на уровне отдельных клеток. В отличие от классических фенотипических подходов, АСМ не требует длительного культивирования и позволяет выявлять морфологические изменения уже через 2–5 часов после воздействия антибиотика с учетом времени сканирования, сегментации и обработки изображений. В дальнейшем автоматизация алгоритмов обработки изображений и интеграция машинного обучения могут значительно расширить масштаб и точность таких исследований, сделав АСМ удобным методом рутинной оценки чувствительности бактерий в клинической практике.

1 Maugeri G. et al. Identification and antibiotic-susceptibility profiling of infectious bacterial agents: a review of current and future trends //Biotechnology journal. – 2019. – V. 14. (№ 1) – P. 1700750.

2 Siezen R. J., van Hylckama Vlieg J. E. T. Genomic diversity and versatility of *Lactobacillus plantarum*, a natural metabolic engineer //Microbial cell factories. – 2011. – V. 10. – P. 1-13.

3 Cobo-Simón M., Hart R., Ochman H. *Escherichia coli*: what is and which are? //Molecular Biology and Evolution. – 2023. – V. 40. (№ 1) – P. msac273.

4 European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing. EUCAST: Research and Development [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eucast.org/publications-and-documents/rd>, свободный. – Дата обращения: 30.03.2025.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СИСТЕМЫ Ti-6Al-4V В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

Гладышева В.С., Воробьев В.Л., Быстров С.Г., Быков П.В., Баянкин В.Я.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
rtytery@mail.ru

Сплавы титана широко применяются в различных областях техники из-за их высокой прочности, пластичности и низкой биотоксичности. Актуальной является проблема разработки технологий модификации поверхности титановых сплавов для повышения их твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и биосовместимости [1, 2]. Одним из широко применяемых методов модификации титановых сплавов является ионно-плазменная обработка их поверхности [3,4], а также облучение потоками ионов N^+ [5].

В данной работе методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа исследованы особенности формирования морфологии поверхности, химического и фазового состава поверхностных слоев и атомно-кристаллической структуры при ионно-плазменной обработке сплава Ti-6Al-4V в плазме тлеющего разряда ионов N^+ без нагрева и с нагревом образцов до температур 300 °C, 500 °C и 700 °C. Время обработки составляло 1 час.

Установлено, что поверхность титанового сплава ВТ6, обработанного в плазме ионов N^+ с нагревом образцов до 500 °C и 700 °C, состоит из блоков округлой формы (рис.1). Предполагается, что данная морфология поверхности формируется в результате образования в поверхностных слоях образцов нитридов титана Ti_2N и TiN , синтез которых приводит к увеличению параметров шероховатости поверхности Ra (рис. 2, а) и Rz (рис. 2, б).

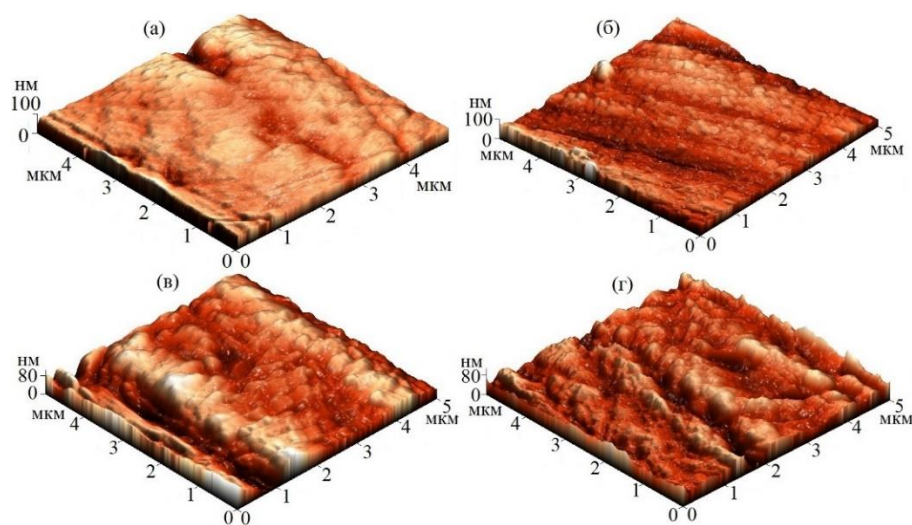


Рисунок 1 – АСМ изображения морфологии поверхности исследуемых образцов: (а) – исходный образец; (б) – плазма N^+ с нагревом образцов до 300 °C; (в) – плазма N^+ с нагревом образцов до 500 °C; (г) – плазма N^+ с нагревом образцов до 700 °C.

Показано, что при азотировании сплава ВТ6 в плазме тлеющего разряда без нагрева и с нагревом образцов до 300 °C наблюдается незначительное (до ~ 15 ат.%) насыщение азотом поверхностных слоев, что обусловлено низкой диффузионной подвижностью азота при данных температурах и процессами окисления компонентов сплава.

При более высоких температурах азотирования 500 °C и 700 °C происходит насыщение поверхности азотом до концентраций ~ 35 ат.%, сопровождающееся образованием нитридов титана Ti_2N и TiN , что обусловлено преобладающей ролью диффузионных процессов в формировании поверхностных слоев в данных условиях обработки.

Ионно-плазменное азотирование при наибольшей из выбранных температур обработки (700 °С) приводит к увеличению микротвердости образцов в 1,7 раза (рис. 2, в).

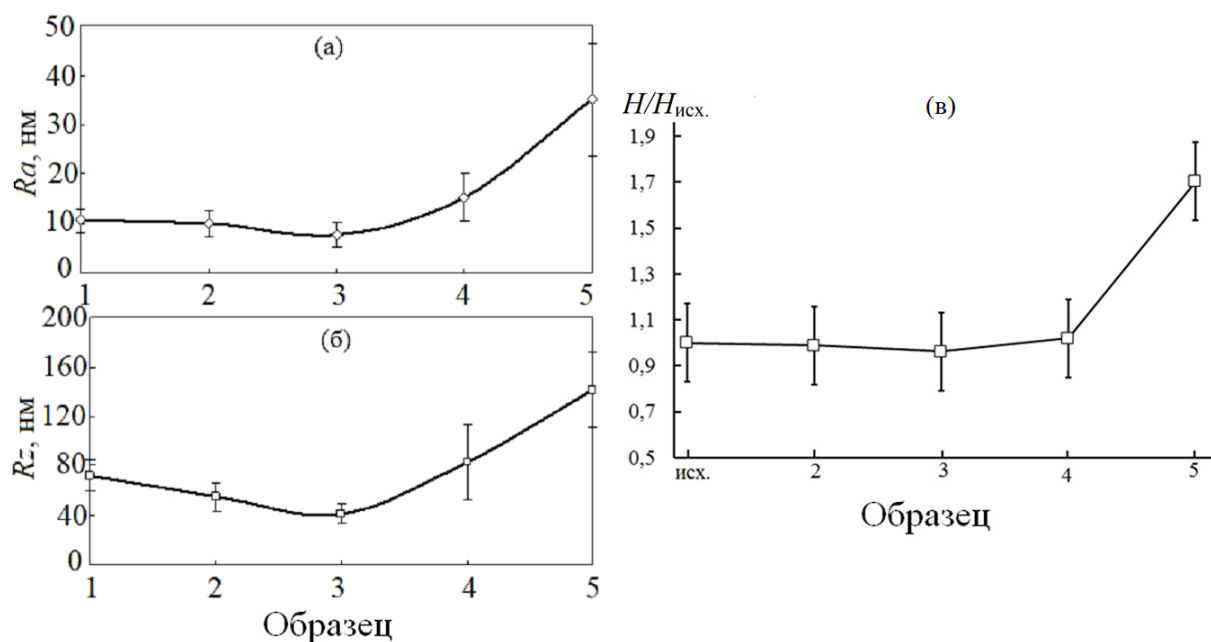


Рисунок 2 – Средняя арифметическая шероховатость Ra (а), высота неровностей профиля по десяти точкам Rz (б) поверхности исследуемых образцов и относительное изменение микротвердости образцов (в). 1 – исходный образец; 2 – плазма без нагрева; 3 – плазма с нагревом 300 °С; 4 – плазма с нагревом 500 °С; 5 – плазма с нагревом 700 °С.

На основании проведенных исследований предполагается, что формирование тонких приповерхностных слоев (~ 20 нм) при обработке в плазме азота без нагрева и с нагревом до 300 °С определяется процессами окисления компонентов сплава, а при обработке с нагревом до 500 °С и 700 °С – процессами диффузии азота.

Проведенные исследования показывают возможность целенаправленной модификации морфологии, механических свойств, химического и фазового состава поверхности и поверхностных слоев сплава ВТ6 путем обработки в плазме ионов N^+ в мягких условиях (при температурах до 700 °С).

1 Bai H., Zhong L., Kang L., Liu J., Zhuang W., Lv Z., Xu Y. A review on wear-resistant coating with high hardness and high toughness on the surface of titanium alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – V. 882. – P. 160645.

2 Liu X., Chu P., Ding C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. – 2004. – V. 47. – P. 49–121.

3 Поболь И.Л., Олешук И.Г., Дробов А.Н., Фун С., Лиин В. Исследование формирования упрочненных слоев на титановых сплавах методом ионноплазменного азотирования // *Вестник Национальной академии наук Белоруссии. Серия физико-технических наук*. – 2019. – Т. 64. (№1). – С. 25–34.

4 Zhevtun I.G., Gordienko P.S., Yarusova S.B., Silant'ev V.E., Yudakov A.A. Producing a microporous structure on titanium alloys by means of plasma surface treatment // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. – 2017. – V. 53. – P. 100–104.

5 Vorobyev V.L., Bykov P.V., Bystrov S.G., Kolotov A.A., Bayankin V. Ya. The effect of the chemical activity of the implanted element to metal alloy components on the formation of surface layers under ion irradiation // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – V. 3. – P. 29–43.

ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ УСИЛИВАЮЩИХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ В ЭКОЛОГИИ

Ахундзянова А.О., Павлова А.А., Малеева К.А.

Научный руководитель – д.х.н., профессор Смирнов Е.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

alexandrakuznetcova17@gmail.com

Спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) является мощным неразрушающим методом анализа, позволяющим исследовать широкий класс материалов на молекулярном уровне. Развитие таких модификаций метода, как спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) и спектроскопия КР с усилением наконечника, существенно расширило его аналитические возможности и чувствительность, что нашло широкое применение в современных исследованиях в области экологических исследований и биомедицины [1].

Золотые наночастицы (НЧ) нашли широкое применение в спектроскопии ГКР благодаря их способности усиливать аналитический сигнал вследствие возбуждения локализованного поверхностного плазмонного резонанса [2]. Особый интерес представляют композитные подложки на основе монослоев золотых НЧ, которые сочетают высокую эффективность усиления с возможностью многократного использования. Исследования показали, что степень усиления сигнала КР зависит от морфологических параметров наночастиц, включая их размер и форму [3].

В данной работе представлена простая методика создания подложек для спектроскопии ГКР на основе монодисперсных золей золотых наносфер (НС) и нанозвезд (НЗ). НС были получены при помощи многостадийного синтеза, основанного на использовании НЧ золота различного диаметра в качестве ядер для последовательного роста [4]. Рост наночастиц осуществлялся при медленном добавлении прекурсора, обеспечивающем поверхностную диффузию атомов золота и равномерное увеличение размера НС. Для получения НЗ применялся подход с контролируемым восстановлением золота ионов серебра, что привело к формированию частиц с разветвленной структурой [5].

Для формирования равномерного покрытия золотых НС на поверхности подложки коллоидные растворы были концентрированы путем центрифугирования и нанесены на стекла с последующей сушкой при повышенной температуре. В случае НЗ применялся метод предварительной самосборки НЧ на границе раздела фаз с последующим переносом полученной тонкой пленки на поверхность подложки [1].

Золи золотых НЧ были охарактеризованы с помощью спектроскопии в видимой области и динамического светорассеяния. Было получено 10 образцов золотых НС, средний размер которых составил от 5 до 90 нм. Морфология подложек была исследована методами оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Усиливающие свойства подложек оценивали с использованием родамина 6Ж. Наибольший коэффициент усиления (~32000) наблюдался для НС диаметром 54 нм. Несмотря на высокую эффективность золотых нанозвезд в спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния в жидкой фазе, коэффициент усиления сигнала для твердофазных подложек на их основе оказался на порядок ниже по сравнению с подложками на основе НС.

Усиливающие подложки были применены для получения спектров КР хлорамфеникола, для которого наблюдается линейная зависимость интенсивности характеристического пика на 1615 см^{-1} от концентрации аналита в диапазоне от 5 до 155 мкмоль/л. Это подтверждает применимость полученных подложек для качественного и количественного анализа поллютантов в окружающей среде.

1. Pavlova A., et al. Self-assembled gold nanoparticles as reusable SERS substrates for polyphenolic compound detection // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. V. 25, № 23. P. 12785.
2. Qi Z., et al. Reusable SERS substrates based on gold nanoparticles for peptide detection // *Sensors*. 2023. V. 23, № 14.
3. Hong S., Li X. Optimal size of gold nanoparticles for surface-enhanced Raman spectroscopy under different conditions // *Journal of Nanomaterials*. 2013. V. 2013.
5. Zheng Y., et al. Successive, seed-mediated growth for the synthesis of single-crystal gold nanospheres with uniform diameters controlled in the range of 5–150 nm // *Particle and Particle Systems Characterization*. 2014. V. 31, № 2. P. 266–273.
6. De Silva Indrasekara A.S., et al. Manipulation of the geometry and modulation of the optical response of surfactant-free gold nanostars: a systematic bottom-up synthesis // *ACS Omega* / American Chemical Society. 2018. V. 3, № 2. P. 2202–2210.

ЛАЗЕРНО-МОДИФИЦИРОВАННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ АНОДИРОВАННОГО ТИТАНА С ОСТРОВКОВОЙ ПЛЕНКОЙ ЗОЛОТА ДЛЯ ПЛАЗМОННОГО УСИЛЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕД

Кострина А.А.¹, Цибульников А.В.¹, Землякова Е.С.^{1,2}, Лятун И.И.¹, Самусев И.Г.¹

¹ ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта»

² ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»

aakostrina@gmail.com

Усиление люминесценции органических сред за счёт возбуждения поверхностных плазмонов на поверхностях благородных металлов является активно развивающимся направлением современной нанофотоники [1,2]. Однако формирование регулярных плазмонных структур на подобных материалах ограничено такими факторами как, например, плавление, нестабильность морфологии при лазерной обработке и высокая стоимость [3]. В качестве альтернативы перспективными являются лазерно-модифицированные поверхности анодированного титана. При импульсном воздействии формируются микро- и наноструктуры с контролируемой морфологией, а нанесение тонкой пленки золота обеспечивает плазмонное усиление оптических свойств.

На международном уровне и в России для создания подобных плазмон-активных структур применяют методы импульсного лазерного осаждения, лазерного отжига и литографии [4,5]. Вместе с тем технологии требуют дополнительных исследований и доработки в части контроля морфологии структур и управлением их оптических свойств.

В настоящей работе реализован комбинированный подход – лазерное структурирование анодированного титана с последующим нанесением островковой пленки золота.

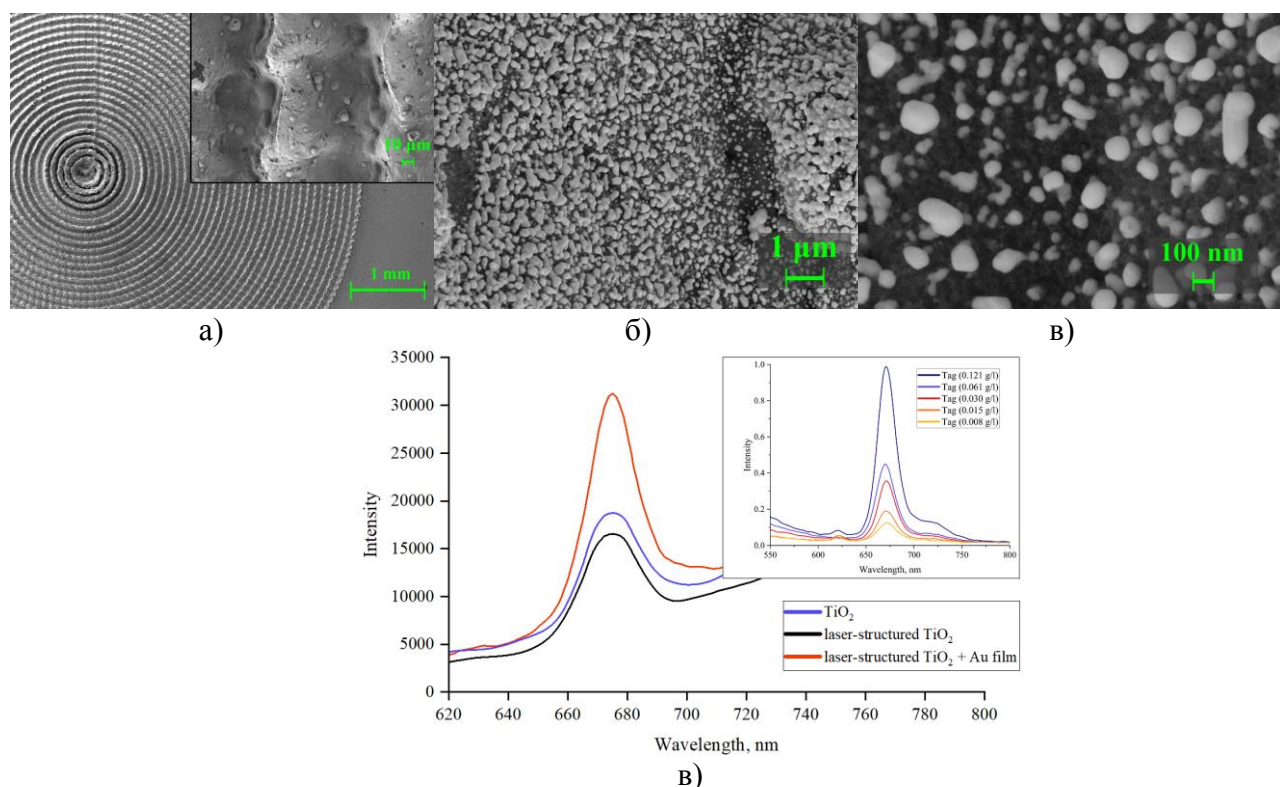


Рисунок 1 – Результаты исследования морфологических и оптических свойств образца и его эффективности для усиления люминесценции органического экстракта: а), б), в) СЭМ образца; г) спектры люминесценции раствора растительного экстракта, нанесенного на поверхности различной степени модификации (вставка – спектры люминесценции раствора)

Результаты СЭМ (рисунок 1а) показали, что поверхность анодированного титана в результате наносекундного лазерного воздействия (580 мДж/см²) характеризуется наличием

пористости и кластеров аблированного материала. После ультразвуковой очистки в течение 30 мин образец был электрохимически покрыт золотой пленкой (5 мин при плотности тока $j = 10 \text{ мА/см}^2$). Она обеспечила равномерное распределение островков размером от 30 до 300 нм на элементах структурированной поверхности (рисунки 1б, в).

Для определения оптических характеристик образца были получены и проанализированы спектры отражения поляризованного излучения с характерной зависимостью от направления поляризации. В спектре R_p наблюдается минимум при 610–615 нм, что указывает на возбуждение поверхностных плазмонов.

Для установления свойств плазмонного усиления на выделенную площадь поверхности синтезированных образцов наносили 0.22 мл этанольного раствора экстракта бархатцев *Tagetes patula L.* Спектр люминесценции раствора экстракта (вставка рисунка 1г) имеет характерный максимум в области 670 нм. Это соответствует положению максимума люминесценции флавоноидов на рассматриваемых образцах (рисунок 1г). Заметно, что структурирование анодированного титана приводит к снижению сигнала, в то время как наличие золотой островковой пленки обеспечивает усиление люминесценции в 1.67 раза. Плазмонный резонанс поверхности близок к спектральному максимуму люминесценции флавоноидов, что способствует усилению локального электромагнитного поля в области эмиссии и, как следствие, оптического отклика.

Для прикладного применения был проведен эксперимент по оценке эффективности смачиваемости поверхности методом лежащей капли. Для вычисления значения контактного угла использовалась формула [6]

$$\varphi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{2h}{d} \right), \quad (1)$$

где h – высота капли, d – диаметр области соприкосновения капли с поверхностью структуры.

Начальное рассчитанное значение контактного угла капли на структуре образца составило $\varphi_0 = 46.68^\circ$. Уменьшение этого значения до 26.48° за 5 мин свидетельствует об эффективном проникновении жидкости в микроструктуру поверхности (время полного растекания капли на аналогичной, пористой поверхности (300 мДж/см^2) составило 12 мин).

Проведенные исследования позволили выявить, что лазерное наноструктурирование анодированного титана с последующим электрохимическим осаждением островковой пленки золота обеспечивает эффективное усиление люминесценции флавоноидов растительного экстракта. Уникальные плазмонные свойства и повышенная смачиваемость делают разработанный материал перспективным для применения в разработке новых функциональных устройств для биомедицинской диагностики, оптоэлектроники и фотокатализа.

- 1 Park J.-E., Kim J., Nam J.-M. Emerging plasmonic nanostructures for controlling and enhancing photoluminescence // Chemical Science. – 2017. – V. 8. – P. 4696–4704.
- 2 Peng H., Li S., Xing J., Yang F., Wu A. Surface plasmon resonance of Au/Ag metals for the photoluminescence enhancement of lanthanide ion Ln^{3+} doped upconversion nanoparticles in bioimaging // Journal of Materials Chemistry B. – 2023. – V. 11. – P. 5238.
- 3 Naik G.V., Shalae V.M., Boltasseva A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver // Advanced Materials. – 2013. – V. 25. – P. 3264–3294.
- 4 Dawood F.H., Ahmed N.S., Mutlak F.A.-H. A novel approach to improve laser resonance via multilayer nanoparticles (Ag-GO-TiO_2) synthesized by pulsed laser deposition // Journal of Optics. – 2024. – (in press).
- 5 Noel L., Khitous A., Molinaro C., Zan H.-W., Berling D., Grasset F., Soppera O. Laser direct writing of crystallized TiO_2 by photothermal effect induced by gold nanoparticles // Adv. Mater. Technol. – 2024. – V. 9. – Art. № 2300407.
- 6 Nakae H., Inui R., Hirata Y., Saito H. Effects of surface roughness on wettability // Acta Materialia. – 1998. – V. 46, № 7. – P. 2313–2318.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОЛЛОИДНОЙ СБОРКИ: ОДНОМЕРНЫЙ БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД

Фумина А.Е.^{1,2}, Белянов И.А.¹, Спешилова А.Б.¹, Ендиярова Е.В.¹, Осипов А.А.^{1,2,3}

Научный руководитель – к.т.н. Осипов А.А.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И.Алферова Российской академии наук

³ Институт минералогии Уральского отделения Российской академии наук
alina.gagaeva@mail.ru

Коллоидная сборка представляет собой перспективный подход к созданию упорядоченных массивов микро- и наноструктур, предлагая экономически выгодную альтернативу традиционным методам литографии [1]. Среди различных техник метод Ленгмюра-Блоджетт показывает наилучшие результаты в формировании высококачественных монослоев значительной площади, что делает его предпочтительным выбором для многих практических применений [2]. Для нахождения оптимальных условий процесса исследователи обычно применяют эмпирический метод проб и ошибок, последовательно варьируя отдельные технологические параметры при неизменности других [3]. Однако, такой подход может столкнуться с трудностями из-за отсутствия информации о том, как выходные характеристики зависят от входных, а также из-за сложных нелинейных взаимодействий между исследуемыми параметрами. Это может привести к необходимости проведения множества экспериментов и увеличить риск того, что действительно оптимальные условия останутся невыявленными. Для решения данной проблемы актуальным становится применение методов машинного обучения, способных ускорить и оптимизировать разработку технологий. В частности, наиболее подходящим является метод байесовской оптимизации, так как он не требует большого объема исходных экспериментальных данных для определения общих закономерностей между входными и выходными параметрами [4]. Вместо этого алгоритм строит вероятностную модель целевой функции, которая обновляется по мере поступления новых данных, что позволяет итеративно исследовать пространство параметров, постепенно приближаясь к оптимальной точке.

В данной работе алгоритм байесовской оптимизации применялся для ускоренной разработки технологии коллоидной сборки с использованием полистирольных сфер с диаметром 1,25 мкм. Для формирования монослоев по методу Ленгмюра-Блоджетт использовалась оригинальная автоматизированная установка, оснащенная системой обратной связи для точного контроля поверхностного давления монослоя. Для реализации алгоритма оптимизации в качестве вероятностной модели была выбрана гауссовская регрессия, на основе распределения которой функция ожидаемого улучшения предсказывала следующее значение потенциального оптимума. Минимизируемая целевая функция F_{sum} представляла собой суперпозицию двух нормированных по среднему выходных параметров и рассчитывалась по формуле (1):

$$F_{sum} = -f_1 + f_2 \quad (1)$$

где f_1 – средняя площадь домена с гексагональной плотной упаковкой (ГПУ) одной ориентации (максимизируется), f_2 – процентное содержание дефектных пустот внутри домена, рассчитанное на среднюю площадь домена (минимизируется). Для проверки выбранной модели был рассмотрен одномерный случай, в котором целевая функция зависела только от одного входного параметра – поверхностного давления монослоя. Его значение варьировалось в диапазоне от 2 до 42 мН/м с шагом 4 мН/м, при этом начальные условия были заданы на границах данного диапазона.

Представленный график на рис. 1а отображает вероятностное распределение целевой функции в зависимости от поверхностного давления монослоя. Видно, что после ввода двух стартовых точек (0 и 0') и проведения трех итераций, предложенных алгоритмом, потенциальный минимум находится в точке, соответствующей давлению 30 мН/м. График на

рис. 1b демонстрирует динамику изменения значений выходных параметров по мере увеличения числа итераций. Начиная с первой итерации, наблюдается увеличение средней площади ГПУ домена и уменьшение незаполненных областей внутри домена, которые присутствовали в значительном количестве в стартовых экспериментах (см. рис. 2а). Как можно заметить из графика на рис. 2b, на пятой итерации происходит ухудшение результатов, что говорит о нахождении глобального минимума целевой функции на четвертой итерации.

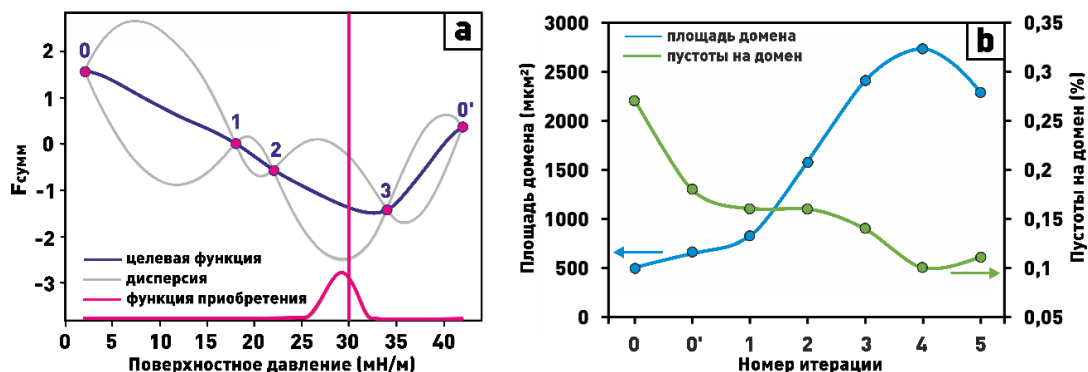


Рисунок 1 – (а) График вероятностного распределения целевой функции после третьей итерации; (б) график зависимостей выходных параметров от числа итераций

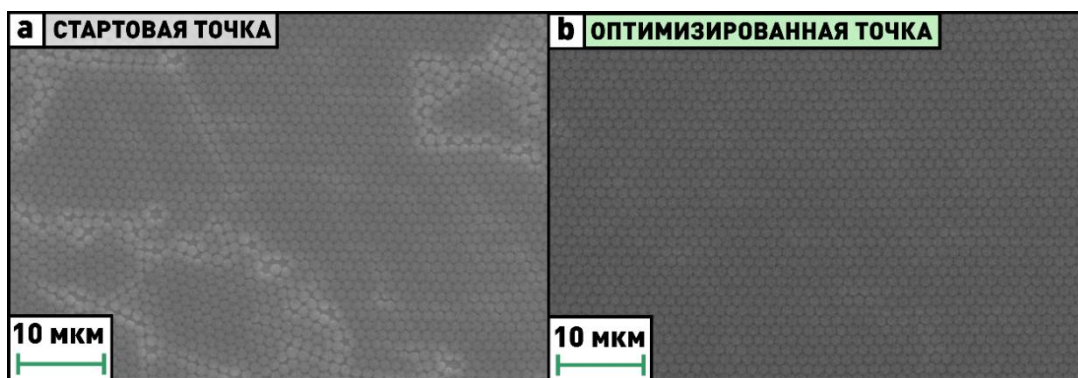


Рисунок 2 – Микрофотографии сформированных монослоев в первой стартовой точке (а) и в оптимизированной алгоритмом точке после четвертой итерации (б)

В результате реализации одномерной байесовской оптимизации было установлено оптимальное значение поверхностного давления монослоя, равное 30 мН/м. При этом значении была достигнута максимальная площадь бездефектного ГПУ домена, равная 2700 мкм² (см. рис. 2b). Таким образом, модель справилась с поставленной задачей за 4 итерации, что позволило сократить количество экспериментов по сравнению с ручным перебором параметров в 2,5 раза, и увеличить площадь бездефектного домена более, чем в 5 раз, по сравнению со стартовыми точками.

- 1 Karimi K., Fardoost A., Mhatre N. A Thorough Review of Emerging Technologies in Micro- and Nanochannel Fabrication: Limitations, Applications, and Comparison // *Micromachines*. – 2024. – V. 15 (№ 10). – P. 1274.
- 2 Zhang C., Cvetanovic S., Pearce J.M. Fabricating ordered 2-D nano-structured arrays using nanosphere lithography // *MethodsX*. – 2017. – V. 4. – P. 229-242.
- 3 Thangamuthu M., Santschi C., Martin O. Reliable Langmuir Blodgett colloidal masks for large area nanostructure realization // *Thin Solid Films*. – 2020. – V. 709. – P. 138195.
- 4 Nakayama R., Shimizu R., Haga T. Tuning of Bayesian optimization for materials synthesis: simulation of the one-dimensional case // *Science and Technology of Advanced Materials: Methods*. – 2022. – V. 2 (№ 1). – P. 119-128.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУР АНОДНЫХ ОКСИДОВ ВЕНТИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В СЕНСОРИКЕ

**Бутманов Д.Д., Прудникова М.Ю., Савчук Т.П., Дронова Д.А., Назаркина Ю.В.,
Дронов А.А.**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники», г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.
butmanovdanil@yandex.ru

Разработка высокочувствительных и селективных сенсорных систем для детектирования разнообразных аналитов, таких как летучие органические соединения и биомолекулы, является актуальной задачей современной науки и техники. Это обусловлено растущими потребностями в экспресс-диагностике заболеваний, мониторинге состояния окружающей среды, контроле качества продукции и обеспечении промышленной безопасности. В этом контексте наноматериалы открывают новые перспективы для создания сенсоров с улучшенными эксплуатационными характеристиками [1].

Применение наноматериалов в сенсорике обусловлено их уникальными свойствами, прежде всего, значительным увеличением удельной площади поверхности чувствительного элемента по сравнению с объемными аналогами. Это приводит к существенному улучшению аналитических характеристик сенсоров: повышению чувствительности, снижению пределов обнаружения, уменьшению габаритов устройств и расширению диапазона рабочих температур. Дополнительным преимуществом является возможность анализа малых объемов проб.

Перспективным методом синтеза наноматериалов для применения в сенсорике является анодное окисление вентильных металлов (например, титана, алюминия), позволяющее формировать высокоупорядоченные наноструктурированные слои (нанотрубки, нанопоры). Варьирование параметров анодирования (напряжение/плотность тока, температура, состав электролита) обеспечивает контролируемое изменение геометрических параметров наноструктур (диаметр, длина пор/трубок) и, как следствие, их функциональных, в том числе сенсорных, свойств. Существенным преимуществом данного метода является формирование наноструктур непосредственно на поверхности подложки, что упрощает технологический процесс изготовления сенсорных устройств, исключая стадии переноса или дополнительного осаждения [2].

В настоящей работе представлены результаты исследований по созданию и применению сенсорных платформ на основе массивов нанотрубок анодного оксида титана (НТАОТ) и пористого анодного оксида алюминия (ПАОА). Рассмотрено применение массивов анодного оксида титана в качестве хеморезистивных сенсорных структур с оригинальной архитектурой для детектирования летучих органических соединений. Исследована возможность использования массивов НТАОТ в качестве матриц с развитой поверхностью для иммобилизации аптамеров с целью создания биосенсорных систем. Кроме того, продемонстрировано применение пленок ПАОА в качестве оптических сенсорных платформ для определения органических веществ. Предложен метод обработки и анализа спектров оптического поглощения таких систем, осложненных интерференционными эффектами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00402, <https://rscf.ru/project/24-19-00402/>.

1 Negahdary M. Recent advances in electrochemical nanobiosensors for cardiac biomarkers / Negahdary, M., Sharma, A., Anthopoulos, T. D., & Angnes, L. //TrAC Trends in Analytical Chemistry. – 2023. – V. 164. – P. 117104.

2 Batool S. A. A review on the fabrication and characterization of titania nanotubes obtained via electrochemical anodization / Batool, SA, Salman Maqbool, M., Javed, MA, Niaz, A. //Surfaces. – 2022. – V. 5. – №. 4. – P. 456-480.

СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНО-БЕЛКОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВИРУС-СВЯЗЫВАЮЩИХ СИСТЕМ

Мораева М.В., Евдокименко А.Ю., Сахабеев Р.Г.

Научный руководитель – к.б.н., доцент Сахабеев Р.Г.

Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический
Университет)
moraevamilena1@gmail.com

Полимерные микро- и наночастицы находят широкое применение в биомедицине, в том числе при разработке современных систем для диагностики и лечения вирусных инфекций. Одним из перспективных подходов является создание так называемых вирусных ловушек — частиц, которые связывают вирусы в крови и препятствуют их распространению в организме. Для этого особенно важны такие свойства, как биосовместимость, способность к биоразложению и возможность прикрепления белков к поверхности частиц.

Полимерные микро- и наночастицы всё чаще рассматриваются как эффективные платформы для решения задач современной медицины. Они находят применение в системах доставки лекарственных веществ, вакцин, биосенсоров и даже в терапии вирусных заболеваний. Особенно актуальным направлением является разработка систем, способных удалять вирусы из кровотока — так называемых вирусных ловушек. Это частицы, которые благодаря модификации белками могут специфически связывать вирусные частицы, снижая вирусную нагрузку и предотвращая распространение инфекции в организме [1, 2].

Важнейшими требованиями к таким системам являются биосовместимость, отсутствие токсичности, способность к биоразложению, а также возможность прикрепления функциональных белков к поверхности частиц. В данной работе основное внимание уделено двум типам биополимеров: хитозану и полимолочной кислоте (ПМК), а также производному хитозана — глутамату хитозана. Хитозан — это природный полимер, получаемый путём деацетилирования хитина, обладающий выраженной положительной зарядовой поверхностью и способностью к связыванию белков. Полимолочная кислота, в свою очередь, представляет собой синтетический биodeградируемый полиэфир, широко применяемый в фармацевтике и биомедицине [2].

Цель исследования заключалась в синтезе микро- и наночастиц на основе указанных полимеров и оценке их способности к связыванию модельных белков. В качестве модельных белков были выбраны бычий сывороточный альбумин (БСА), обладающий стабильностью и доступностью, и sfGFP — вариант зелёного флуоресцентного белка, позволяющий визуализировать процесс связывания. Частицы были получены методами ионной гелизации (для хитозана и глутамата хитозана) и наноосаждения (для ПМК). Далее проводилось связывание белков с поверхностью частиц двумя способами: физической адсорбцией и ковалентной иммобилизацией с помощью активаторов EDC/NHS [2, 3].

Анализ результатов показал, что частицы на основе глутамата хитозана обладают лучшими характеристиками по удержанию белков. Это объясняется тем, что введение глутаминовой кислоты улучшает растворимость и стабилизирует распределение заряда на поверхности частиц. При адсорбционном связывании эффективность была выше в случае глутамата хитозана по сравнению с чистым хитозаном. Ковалентное связывание дало ещё лучшие результаты — особенно для sfGFP, поскольку этот белок чувствителен к условиям окружающей среды и требует мягких методов фиксации. ПМК-частицы, несмотря на свою стабильность, показали низкую эффективность связывания при отсутствии дополнительных функциональных групп на поверхности.

Отдельное внимание уделялось условиям реакции: pH среды, соотношению массы белка и полимера, времени взаимодействия. Оптимальные условия для адсорбции БСА наблюдались при pH 5,5–6,0, в то время как sfGFP лучше удерживался при pH около 7,0. При использовании ковалентного связывания через карбодиимидную активацию наилучшие результаты

достигались при добавлении NHS-активатора и проведении реакции при температуре +4°C. Это позволяло сохранить нативную структуру белка и повысить эффективность закрепления.

Таким образом, результаты подтверждают, что глутамат хитозана — перспективный материал для разработки биофункциональных полимерных частиц. Он сочетает в себе высокую степень связывания белков, хорошую биосовместимость и возможность модификации поверхности. Это делает его подходящей основой для создания вирусных ловушек, которые могут использоваться как в диагностических, так и в терапевтических целях. Дальнейшие исследования будут направлены на иммобилизацию функциональных антител и рецепторов, специфически связывающих вирусные антигены, а также на оценку эффективности полученных систем в клеточных и животных моделях.

1. Бакулин А.В., и др. Использование хитозана для выделения β -лактоглобулина из смеси белков молочной сыворотки // Биотехнология. – 2011. – №1. – С. 34–41.

2. Соснов А.В., и др. Разработка систем доставки лекарственных средств с применением микро- и наночастиц: монография. – М.: Научный мир, 2020. – 158 с.

3. Шагдарова Б.Ц. Получение алкилированных и ацилированных производных хитозана и исследование их биологических свойств: дис. канд. биол. наук. – М., 2016. – 147 с.

РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ ДЛЯ ДОСТАВКИ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ИЗОТОПА РАДИЙ-223

Ахметова Д.Р.^{1,2}, Тищенко Ю.А.², Тимин А.С.², Шипиловских С.А.¹

¹Национальный исследовательский университет ИТМО, МНОЦ "Физики наноструктур",
Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ИБСиБ, Санкт-Петербург, Россия
akhmetova.lab.dr@gmail.com

Металлоорганические каркасы (МОК) демонстрируют значительный потенциал в качестве универсальных материалов с исключительными структурными свойствами, находящими применение в адсорбции газов, катализе и биомедицине, включая доставку терапевтических веществ и радиоизотопов [1]. В настоящее время известны работы, демонстрирующие интеграцию в структуру МОК таких изотопов как лютеций-177 [2], индий-111 [3] и иттрий-90 [4]. Однако в целях применения к локализованной и высокоэффективной терапии актуальна проблема разработки платформ для доставки альфа-излучающих изотопов, например перспективного радия-223 (^{223}Ra) [5]. ^{223}Ra уже активно применяется для терапии костных метастаз [6]. Для расширения его терапевтического потенциала предлагается система доставки на основе МОК UiO-66-NH_2 , которая позволит достичь прицельного эффекта терапии с минимальным воздействием на здоровые органы и ткани.

В данной работе были получены микро- и наноразмерные UiO-66-NH_2 МОК (микроМОК и наноМОК) и охарактеризованы рядом физико-химических методов, включая SEM (Рис. 1А), EDS, PXRD, Raman, BET. Токсичность и биосовместимость МОК были исследованы *in vitro* на клетках рака молочной железы 4Т1 и RBC (эритроцитах). Для интеграции изотопа радий-223 был разработан и оптимизирован метод радиомечения МОК, основанный на осаждении ионов $^{223}\text{Ra}^{2+}$ в присутствии ионов Ba^{2+} и SO_4^{2-} . Также была исследована эффективность радиомечения (Рис.1Б) и радиохимическая стабильность комплекса МОК-изотоп в течение 7 дней (Рис. 1В).

По результатам работы были получены МОК с октаэдрической морфологией и размерами в диапазоне 0,5–1,5 мкм для микроМОК и 150–350 нм для наноМОК. *In vitro* исследования полученных МОК показали низкую токсичность (< 15% для клеток 4Т1) и низкую гемолитическую активность (< 10%). Разработанный протокол радиомечения продемонстрировал высокую эффективность (более 97% после 3 отмывок), а также стабильную связь с полученными МОК на протяжении 7 дней инкубации в 0,9% NaCl.

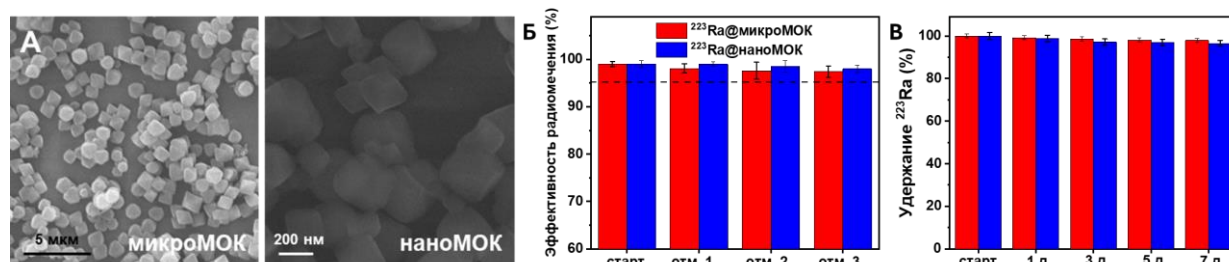


Рисунок 1 – (А) SEM изображения микроМОК и наноМОК, (Б) График эффективности радиомечения микроМОК и наноМОК изотопом ^{223}Ra , (В) График удержания изотопа ^{223}Ra на микроМОК и наноМОК в течение 7 дней.

Данное исследование показало, что UiO-66-NH_2 МОК обладают стабильной морфологией и размерностью, а также низкой токсичностью и отсутствием негативного влияния на клетки крови, что является необходимыми параметрами для системы доставки. Разработанный метод радиомечения UiO-66-NH_2 МОК, являясь высокоэффективным,

одностадийным и малозатратным, что показывает перспективы к последующей его автоматизации для применения в современной клинической практике.

- 1 Furukawa H. et al. The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks // Science. – 2013. – V. 341. – № 6149.
- 2 Liang R. et al. In Vitro Anticancer Ability of Nano Fluorescent 111 In-MIL-68/PEG-FA on Hela Cells // Chemistry – A European Journal. – 2022. – V. 28. – № 19.
- 3 Liang R. et al. In Vitro Anticancer Ability of Nano Fluorescent 111 In-MIL-68/PEG-FA on Hela Cells // Chemistry – A European Journal. – 2022. – V. 28. – № 19.
- 4 Qi X. et al. Yttrium-90-doped metal–organic frameworks (MOFs) for low-dose rate internal radiation therapy of tumors // J Mater Chem B. – 2025. – V. 13. – № 18. – P. 5466–5481.
- 5 Morris M.J. et al. Radium-223 mechanism of action: implications for use in treatment combinations // Nat Rev Urol. – 2019. – V. 16. – № 12. – P. 745–756.
- 6 Turner P.G., O’Sullivan J.M. 223 Ra and other bone-targeting radiopharmaceuticals—the translation of radiation biology into clinical practice // Br J Radiol. –2015. – V. 88. – № 1050. – P. 20140752.

СИНТЕЗ И ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В БИОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Комник В. В., Чиликина А. Ю., Ляшук В. К.
Научный руководитель – к. х. н., Кладько Д. В.
 Университет ИТМО
 av.ien@mail.ru

Введение. Развитие биокаталитических систем на основе ферментов представляет значительный интерес для медицины, биотехнологии и промышленного катализа. Однако ключевыми ограничениями остаются низкая стабильность ферментов и сложность их сепарации из реакционной среды. Магнитные наночастицы (МНЧ) обладают уникальными свойствами, позволяющими решить эти проблемы за счет управляемого магнитного разделения и эффективной иммобилизации биокатализаторов. Таким образом, разработка методов синтеза и функционализации МНЧ для создания высокоактивных и рециклируемых биокаталитических систем является актуальной научной задачей [1].

Основная часть. В данной работе исследовались наночастицы магнетита (Fe_3O_4), синтезированные методом соосаждения путем совместного осаждения ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} (1:2) в щелочной среде ($\text{pH}=11$) при 80°C с последующей промывкой и сушкой, и феррита кобальта (CoFe_2O_4), полученные гидротермальным методом в автоклаве при 200°C в течение 12 часов из раствора солей кобальта и железа (1:2). Морфологию и размер частиц анализировали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а их кристаллическую структуру изучали методом рентгенофазового анализа (РФА). Каталитическую активность синтезированных частиц оценивали в реакции окисления 3,3',5,5'-тетраметилбензидина (ТМБ) в присутствии перекиси водорода (H_2O_2), измеряя оптическое поглощение раствора ТМБ при 652 нм на спектрофотометре в зависимости от времени и контролируя изменение интенсивности синего окрашивания, свидетельствующего о протекании каталитического процесса [2]. Для количественной оценки каталитической эффективности были определены ключевые кинетические параметры: константа Михаэлиса (K_M), отражающая сродство к субстрату; каталитическая константа (k_{cat}), характеризующая скорость превращения субстрата; каталитическая эффективность ($\frac{k_{cat}}{K_M}$), показывающая эффективность работы при низких концентрациях субстрата; максимальная скорость реакции (V_{max}), достигаемая при насыщении субстратом; и концентрация активных центров ($[E_a]$), определяющая количество каталитически активных участков на поверхности наночастиц, см. Таб. 1. Синтезированные наночастицы Fe_3O_4 демонстрируют более высокую каталитическую эффективность ($\frac{k_{cat}}{K_M} = 911,7 \frac{1}{\text{M}\cdot\text{s}}$) по сравнению с CoFe_2O_4 ($\frac{k_{cat}}{K_M} = 792,1 \frac{1}{\text{M}\cdot\text{s}}$), что свидетельствует о лучшей способности катализировать окисление ТМБ при низких концентрациях субстрата.

Параметр	Fe_3O_4	CoFe_2O_4
$K_M, \mu\text{M}$	313,5	313,3
$k_{cat}, \frac{1}{\text{s}}$	0,3	0,2
$\frac{k_{cat}}{K_M}, \frac{1}{\text{M}\cdot\text{s}}$	911,7	792,1
$V_{max}, \frac{\mu\text{M}}{\text{s}}$	0,1	0,1

Таблица 1 – Сравнительный анализ кинетических параметров для Fe_3O_4 и CoFe_2O_4

Выводы. Синтезированные наночастицы Fe_3O_4 и CoFe_2O_4 проявляют значительную каталитическую активность в реакции окисления ТМБ, что подтверждается комплексом кинетических параметров. Несмотря на близкие значения константы Михаэлиса и сопоставимую плотность активных центров, наночастицы Fe_3O_4 демонстрируют несколько более высокую каталитическую эффективность и максимальную скорость реакции. Оптимизированные условия синтеза (температура, pH, время реакции) обеспечили формирование материалов с воспроизводимыми каталитическими свойствами, что делает их перспективными для применения в биосенсорике и экологических технологиях, особенно в системах, требующих устойчивых и эффективных катализаторов окислительных процессов.

1. Zandieh M., Liu J. Nanozymes: Definition, Activity, and Mechanisms // *Advanced Materials*. 2024. V. 36, 2211041.
2. Gu S., Risse S., Lu Y., Ballauff M. Mechanism of the oxidation of 3,3',5,5'-tetramethylbenzidine catalyzed by peroxidase-like Pt nanoparticles immobilized in spherical polyelectrolyte brushes: A kinetic study // *ChemPhysChem*. 2020.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ НА ОСНОВЕ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСОВ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ВЫСВОБОЖДЕНИЕМ ДОКСОРУБИЦИНА

Русакова В.А.¹, Ахметова Д.Р.^{1,2}, Тимин А.С.¹, Шипиловских С.А.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ИБСиБ, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, МНОЦ "Физики наноструктур", Санкт-Петербург, Россия
rusakovalada@gmail.com

В современном обществе активно разрабатываются различные наноструктуры для диагностики и лечения злокачественных опухолей [1]. Применение систем доставки способствует повышению эффективности противоопухолевых препаратов и снижению их токсического воздействия на здоровые ткани. Однако, при создании систем контролируемой доставки лекарств необходимо учитывать множество факторов, таких как процент инкапсуляции активного вещества, его кинетика высвобождения из наноструктур и токсичность. Металл-органические каркасы (МОК) представляют собой новый класс материалов с трехмерной структурой, формируемой за счет взаимодействия переходных металлов и органических лигандов. В настоящее время МОК на основе циркония (МОК UiO-66) широко применяются в каталитических процессах. В научном сообществе существует мнение, что МОК UiO-66 могут быть использованы в онкологии в качестве систем целевой доставки лекарств [2].

Цель данного исследования заключается в изучении контролируемой загрузки доксорубина (ДОКС) в микро- и наноМОК UiO-66-NH₂, высвобождения препарата в нормальной и кислой средах, а также анализа токсичности полученных носителей на эритроцитах человека. Инкапсуляция ДОКС в МОК осуществлялась методом адсорбции. Для определения процента загрузки ДОКС МОК были отмыты, и собраны супернатанты. Для оценки процента высвобождения ДОКС осадки полученных частиц инкубировали в фосфатно-буферном растворе при pH 5.5 и pH 7. Процесс высвобождения препарата оценивался в течение 72 часов, а полученные супернатанты анализировались с использованием метода спектрофотометрии.

Процент адсорбированного ДОКС составил ~59% для микроМОК и ~82% для наноМОК. Скорость высвобождения лекарственного средства из обоих типов частиц была выше при pH 5.5, чем при pH 7. Из микроМОК в кислой среде за время эксперимента высвободилось ~44% терапевтического препарата, в нормальной среде – ~29% (Рис. 1), в то время как для наноМОК эти показатели составили ~43% и ~32% (Рис. 2). Данные исследования гемолитической активности подтвердили нетоксичность микро- и наноМОК (процент гемолиза не превысил 10%).

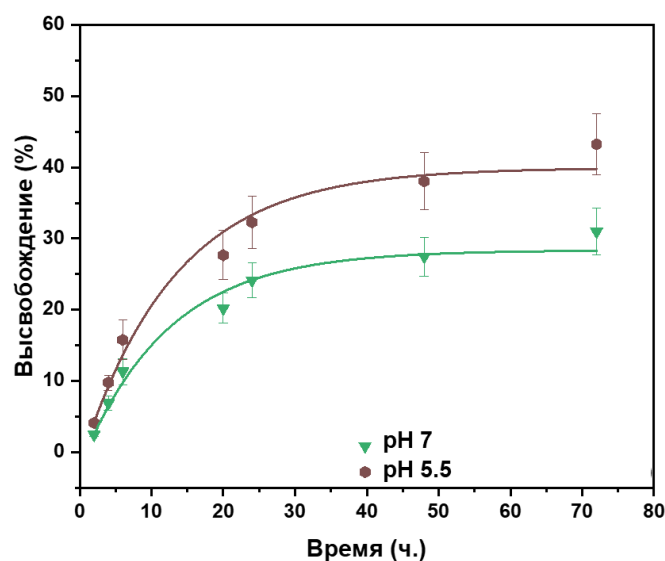


Рисунок 1 – График высвобождения доксорубина из микроМОК при различных значениях pH в течение 72 часов.

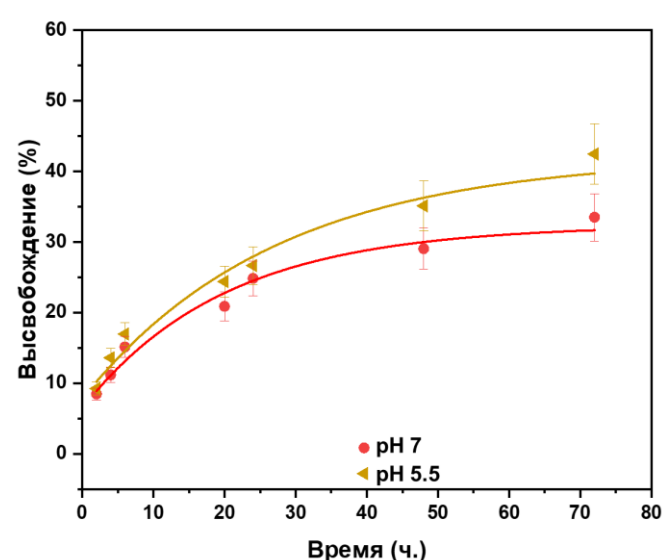


Рисунок 2 – График высвобождения доксорубина из наноМОК при различных значениях pH в течение 72 часов.

Полученная информация позволяет в дальнейшем использовать микро- и наноМОК для создания системы доставки с целью терапии злокачественных новообразований.

1. Awasthi R. et al. Nanoparticles in Cancer Treatment: Opportunities and Obstacles // Current Drug Targets. – 2018. – V. 19. – №14. – P. 1696–1709.
2. Jiaxin Ma et al. Current and promising applications of UiO-based MOFs in breast cancer therapy // Reactive and Functional Polymers. – 2024. – V. 200.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОСОЕДИНЕНИЙ НА РОСТОСТИМУЛИРУЮЩУЮ АКТИВНОСТЬ ПШЕНИЦЫ

Лашина В. Д.¹, Король А. А.¹, Жежерин М.О.², Бузько В. Ю.^{1,2}, Подушин Ю. В.¹,

Научный руководитель – Сухно И. В.¹, канд. хим. наук, доцент

¹ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

²ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет»

vika24-06@yandex.ru

Микроудобрения, применяемые в форме агрегатов наночастиц размером от 1 до 10 микрон, обладают преимуществом перед другими агрохимикатами того же химического состава. С одной стороны, эти частицы достаточно небольшие, из-за чего они обладают хорошей способностью к ионообмену, улучшенной диффузией, адсорбцией ионов и комплексообразованию. С другой стороны, в отличие от более мелких частиц они медленнее отдают в почвенные растворы химические элементы, что позволяет, например, разово использовать большие дозировки микроудобрений, не боясь отрицательного эффекта от передозировки. Обработка препаратом в такой форме позволяет эффективно и равномерно снабжать культуру микроэлементами длительный промежуток времени. Ранее было показано [1-5], что химические соединения в форме наночастиц проявляют особое физиологическое воздействие на растения, не выявляемые для них в других химических формуляциях.

Как известно, при обработке наночастицами урожай пшеницы может повышаться до 15%, зеленой массы – до 25, картофеля – до 30% [1–5]. У подсолнечника, рапса, горчицы за счет обработки наночастицами существенно повышается содержание масла [3–5].

С практической и экономической точки зрения, использование наночастиц оксидов металлов для стимуляции пшеницы более оправдано. Обычно для этой цели используют наночастицы оксиды железа, цинка или титана [6-8]. Использование водных дисперсий наночастиц оксидов металлов также может принципиально улучшать условия для прорастания зерна пшеницы. В связи с этим решено было провести скрининг наночастиц оксидов металлов по их ростостимулирующей активности на озимой пшенице сорта Гром.

Препараты оксидных наночастиц были получены в центре нанобиотехнологий Кубанского ГАУ методом модифицированного пирохимического золь-гель синтеза. По химическому составу образцы № 1 и № 2 представляли из себя композитный марганец-магниевый оксид, а образец № 3 – диоксид марганца.

По данным метода оптической спектроскопии диффузного отражения (СДО) эти наноматериалы представляли собой порошковые оксидные полупроводниковые соединения с выраженной фотокаталитической активностью и с рассчитанной шириной оптической запрещенной зоны в диапазоне от 2,94 до 3,16 эВ. Средний размер наночастиц: для образца №1 – ~ 38 нм, для образца №2 – ~ 36 нм, для образца №3 – ~ 40 нм.

При обработке наночастицами зерно пшеницы замачивали в воде, содержащей 1 мг/мл наноматериала, в течение 3 минут. Зерно контрольного варианта также 3 минуты держали в дистиллированной воде. После обработки семена пшеницы проращивали во влажной камере на фильтровальной бумаге при комнатной температуре. В результатах представлены обобщённые данные трёх серий опыта с биологической повторностью в 60 растений. Массу, длину и всхожесть проростков оценивали на пятые-шестые сутки вегетации. Для статистической обработки результатов применяли дисперсионный анализ.

Средняя масса проростка пшеницы в контрольном варианте составила 97 ± 9 мг. Масса проростков пшеницы, обработанных исследованными оксидными наночастицами, для образца №1 составила 110 ± 5 мг, при обработке №2 – 107 ± 12 мг, при обработке №3 – 112 ± 5 мг. Помимо измерения веса проростков пшеницы также были проведены измерения длины их корней и побега, представленные на рисунке 2.

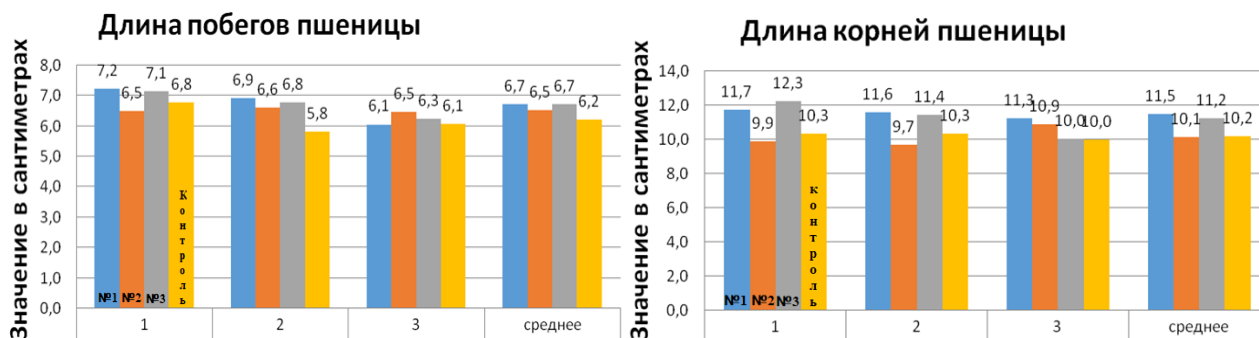


Рисунок 1 – Сравнение длины побегов проростков пшеницы по вариантам опыта ($НСР_{05} = 0,9$)

По данным рисунка 2 можно сделать вывод, что исследованные наночастицы не дали существенной прибавки в развитии побегов растений пшеницы, в свою очередь, существенный прирост длины корней обеспечил вариант с обработкой семян пшеницы наночастицами образцами №1 и №3, что говорит об их ростостимулирующей способности.

Спектроскопия СДО показала, что в листьях проростков пшеницы, обработанных исследованными нанопорошками, количество воды меньше на 2,5-3% относительно контроля, что позволяет сделать вывод о положительном влиянии исследованных нанопорошковых препаратов на засухоустойчивость пшеницы.

Результаты скрининга исследованных нанопорошковых препаратов подтвердили перспективность поиска новых регуляторов роста растений на основе оксидных наночастиц. Обработка семян пшеницы исследованными образцами оксидных наночастиц стимулировала ростовые процессы на начальных этапах вегетации озимой пшеницы.

1. Райкова, А. П., Паничкин, Л. А., Райкова, Н. Н. Исследование влияния ультрадисперсных порошков металлов, полученных различными способами, на рост и развитие растений / А. П. Райкова // Материалы Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии и информационные технологии – технологии XXI века». - 2006, М. - С. 108–111. – Текст: непосредственный.
2. Глущенко, Н. Н., Богословская, О. А., Ольховская И. П. Сравнительная токсичность солей и наночастиц металлов и особенность их биологического действия Н. Н. Глущенко // Материалы Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии и информационные технологии – технологии XXI века». - 2006, М. - С. 93–95. – Текст: непосредственный.
3. Володина, Л. А., Жигач, А. Н., Лейпунский, И. О., Зотова, Е. С., Глущенко, Н. Н. Влияние физико химических характеристик модифицированных поверхностей наноразмерных частиц меди на ингибирование роста культуры клеток и электро-статические свойства поверхности бактерий / Л. А. Володина // Биофизика. – 2013. - № 58(3). - 507–515. -- ISSN: 0006-3029.- Текст: непосредственный.
4. Зорин, Е. В. Особенности влияния предпосадочной обработки клубней картофеля ультрадисперсными порошками и солями железа и меди на их урожайные свойства: специальность 06.01.09 «Растениеводство»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / Зорин Евгений Викторович: Рязанской государственной сельскохозяйственной академии им. проф. П.А. Костычева. - Москва, 2009. - 21 с. – Место защиты: Всероссийский научно-исследовательский институт картофельного хозяйства.- Текст: непосредственный.
5. Паничкин, Л. А., Райкова, А. П. Использование нанопорошков металлов для предпосевной обработки семян с.-х. культур / Л. А. Паничкин // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2009. - № 1. – С. 59–65. ISSN: 0021-342X. - Текст: непосредственный.

6. Hassan, N.S. et al. Magnetite and zinc oxide nanoparticles alleviated heat stress in wheat plants / N.S. Hassan // *Curr. Nanomater.* – 2018. - № 3. – P. 32–43. - Текст: непосредственный.
7. Muhammad, F. et al. Ameliorating drought effects in wheat using an exclusive or co-applied rhizobacteria and ZnO nanoparticles / F. Muhammad. // *Biology.* – 2022. - № 11. – P. 1564. - Текст: непосредственный.
8. Raza, M.A.S. et al. ZnO-nanoparticles and stage-based drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.): effect on morpho-physiology, nutrients uptake, grain yield and quality / M.A.S. Raza // *Sci. Rep.* – 2025. - № 13 15(1). - P.5309. - Текст: непосредственный.

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-N-ИЗОПРОПИЛАКРИЛАМИДА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Лобанова Н.Р., Ефремов Ю.М., Костюк С.В., Котова С.Л., Тимашев П.С.

Научный руководитель – к.б.н., Ефремов Ю.М.

ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М.

Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский

Университет), Научно-технологический парк биомедицины, Институт регенеративной

медицины, Москва, Россия

n.r.lobanova@gmail.com

Введение

Термочувствительные микрогели на основе поли-N-изопропилакриламида (п(НИПАМ)) представляют значительный интерес для биомедицины благодаря обратимому фазовому переходу при температуре, близкой к физиологической (~32°C) [1]. Однако недостаточное понимание динамики их морфо-механических свойств при термическом воздействии ограничивает разработку точных систем доставки лекарств. Зарубежные исследования выявили увеличение жесткости микрогелей при коллапсе [2], но системные данные по сополимерам с метакриловой кислотой (МК) и метоксиполиэтиленгликолем (М-ПЭГ) отсутствуют. Данное исследование восполняет этот пробел, предлагая комплексный анализ термоиндуцированных изменений с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Методология и результаты

Для изучения морфологии и механики микрогелей п(НИПАМ) с МК (3–7 мол.%) и М-ПЭГ (10 вес.%) применен метод АСМ в режиме силового картирования. Исследования в водной среде при температурах 27–45°C проводились с использованием кантилеверов PFQNM-LC-A-CAL на атомно-силовом микроскопе Bioscope Resolve AFM (Bruker, США). Полученные изображения были обработаны с помощью ранее разработанных скриптов в программном обеспечении MatLab (США) [3]. Модуль Юнга рассчитывался по модели Герца с коррекцией на толщину частиц, где взаимодействие зонда с образцом описывается уравнением:

$$F = \frac{4}{3} \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)} \cdot f(\delta) \cdot \sqrt{R} \cdot \delta^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Затем были построены кривые зависимости параметров от температуры в программе Origin Pro 2024 (США). При анализе данных, полученных после обработки изображений, были рассчитаны средние значения высоты и модуля упругости микрогелей и стандартное квадратичное отклонение.

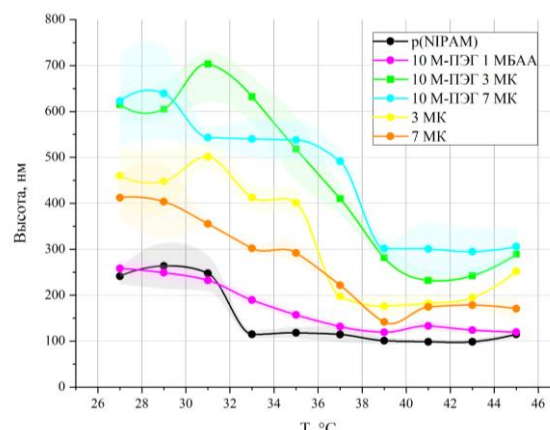
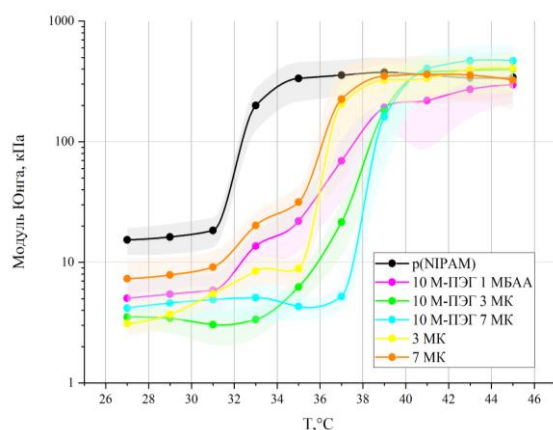


Рисунок 1 – Зависимость модуля Юнга (А) и высоты (Б) микрогелей от температуры

Анализ выявил критическую зависимость свойств от состава и температуры (Рис. 1). Частицы сохраняют сферическую форму от 241 нм для чистого п(НИПАМ) до 622 нм для образцов с М-ПЭГ и МК. При нагреве выше температуры фазового перехода все образцы демонстрировали сокращение высоты (Табл. 2), сопровождающееся экспоненциальным ростом модуля Юнга (Табл.1). Наибольший контраст механических свойств зафиксирован у образцов с МК, где низкая начальная жесткость сменялась высокими значениями при 45°C. Важным открытием стало влияние М-ПЭГ: его введение повышало температуру перехода до 40°C за счет образования дополнительных водородных связей с водой, в то время как МК формировала рыхлую начальную структуру, усиливающую механический контраст при фазовом переходе.

Таблица 1 – Рассчитанные параметры температуры фазового перехода и изменения модуля Юнга микрогелей

	Температура фазового перехода, °C	Начальный модуль Юнга, кПа	Конечный модуль Юнга, кПа	Относительное изменение модуля упругости ($\Delta E/E_0$, %)
п(НИПАМ)	33	15.3 ± 3.7	338.7 ± 104.8	2123
10 М-ПЭГ 1 МБАА	39	5.0 ± 1.9	296.3 ± 16.8	5785
10 М-ПЭГ 3 МК	39	3.5 ± 0.8	400.4 ± 150.7	11286
10 М-ПЭГ 7 МК	40	4.2 ± 1.2	466.8 ± 156.6	11067
3 МК	37	3.1 ± 0.6	405.1 ± 149.4	12926
7 МК	37	7.3 ± 3.2	324.2 ± 137.1	4325

Таблица 2 – Рассчитанные параметры изменения высоты микрогелей

	Высота при 27°C, нм	Высота при 45°C, нм	Степень усадки (ϵ , %)
п(НИПАМ)	241.4 ± 16.6	114.9 ± 8.4	52
10 М-ПЭГ 1 МБАА	258.1 ± 16.8	119.7 ± 3.7	54
10 М-ПЭГ 3 МК	614.8 ± 33.5	289.4 ± 7.5	53
10 М-ПЭГ 7 МК	622.2 ± 96.7	305.7 ± 42.9	51
3 МК	459.8 ± 60.8	251.8 ± 14.4	45
7 МК	412.4 ± 50.2	170.6 ± 27.0	59

Заключение

Установлены количественные закономерности влияния состава полимера на термомеханические свойства микрогелей. Введение М-ПЭГ позволяет целенаправленно регулировать температуру фазового перехода, адаптируя материалы для гипертермической терапии. Сополимеризация с МК создаёт системы с высоким градиентом жесткости, перспективные для сенсорных приложений. Метод АСМ в режиме силового картирования подтверждён как оптимальный инструмент для *in situ* мониторинга структурных переходов. Полученные корреляции «состав–температура–механика» открывают путь к дизайну микрогелей с программируемым откликом для адресной доставки лекарств, где контроль механических свойств обеспечивает точное управление высвобождением активных веществ.

1. Schild H.G. Poly(N-isopropylacrylamide): experiment, theory and application // Prog. Polym. Sci. 1992. V. 17, № 2. P. 163–249.
2. Wiedemair J. et al. In-situ AFM studies of the phase-transition behavior of single thermoresponsive hydrogel particles // Langmuir. 2007. V. 23, № 1. P. 130–137.
3. Efremov Y.M. et al. Measuring nanoscale viscoelastic parameters of cells directly from AFM force-displacement curves // Sci. Rep. 2017. V. 7, № 1. P. 1541.

POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHIC APPLICATIONS IN NANO-IOT SYSTEMS

Qayyum A.

Scientific Supervisor – D.Sc., Assoc. Prof. Sergey Bezzateev

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

qayyum068@gmail.com

The integration of nanostructures into the Internet of Things (IoT) landscape is enabling the emergence of nano-IoT systems—ultra-compact, energy-efficient devices widely used in biomedical sensors, smart textiles, structural monitoring, and environmental sensing applications [1]. These systems operate under tight hardware constraints and require cryptographic mechanisms that ensure both quantum resistance and efficiency.

This work explores lightweight post-quantum cryptographic (PQC) protocols tailored for nano-IoT systems. The focus is on lattice-based schemes, in particular ML-KEM and ML-DSA, both of which have been selected for standardization by NIST due to their strong theoretical security based on the Learning With Errors (LWE) problem [2,3]. These schemes are suitable for constrained devices when appropriately optimized in terms of memory, key size, and computational steps.

To demonstrate feasibility, we implemented a compact post-quantum communication protocol in Python, consisting of key generation, encapsulation, decapsulation, and digital signature operations. This prototype simulates a typical device-to-gateway secure communication flow and is designed to support software-based evaluation on limited-resource platforms. The implementation serves as a functional demonstration for the conference and enables reproducible testing and adaptation for future embedded deployment.

This contribution establishes a foundation for subsequent phases of research focused on integrating cryptographic primitives with real nanoscale hardware platforms and validating performance across use cases such as sensor telemetry integrity, firmware update authentication, and device-level identity verification.

1. Koenig K., Karg M., Reuter M., Lemmer U., Offenhäusser A., Mayer D. Nanostructured materials for wireless implantable medical devices // *Advanced Materials Technologies*. – 2020. – V. 5, No. 5. – P. 1900750. – DOI: 10.1002/admt.201900750.
2. Regev O. On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography // *Journal of the ACM*. – 2009. – V. 56, No. 6. – Art. 34. – DOI: 10.1145/1568318.1568324.
3. National Institute of Standards and Technology. Post-Quantum Cryptography Standardization. – 2024. – URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography> (accessed: 24.06.2025).

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЯДА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Паис Переда Х.Х.

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Сорокин П.Б.

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС
pais@edu.misis.ru

Алюминий широко применяется в промышленности благодаря низкой плотности, высокой коррозионной стойкости, а также хорошей теплопроводности и электропроводности. Однако его использование ограничено быстрым снижением механических свойств при повышенных температурах [1]. Перспективным подходом к повышению термостабильности и механических характеристик алюминия является создание композитов с металлической матрицей (ММК), где алюминиевая матрица упрочняется включениями интерметаллических фаз [2]. Такие структуры сочетают преимущества легкой матрицы с повышенными прочностными свойствами упрочняющей фазы.

В данной работе методом молекулярной динамики исследовано влияние включений интерметаллидов Al_3Cr и $AlNi_3$ на механические свойства алюминиевой матрицы. Был использован машинно-обученный межатомный потенциал для системы Al–Cr–Fe–Co–Ni–Cu [3]. Для определения равновесной формы кластеров применен метод Вульфа.

Моделирование выявило значительное улучшение упругих свойств для обоих композитов по сравнению с чистым алюминием. Для композита Al/ $AlNi_3$ с массовой долей никеля 6.61% объемный модуль упругости увеличился на 9.1%, модуль Юнга – на 4.5%, сдвиговый модуль – на 4.1%. Для композита Al/ Al_3Cr с массовой долей хрома 4.71% наблюдалось увеличение объемного модуля упругости на 3.0%, модуля Юнга – на 6.6%, сдвигового модуля – на 7.5%.

Несмотря на потенциальные проблемы при формировании композитов, такие как несоответствие параметров кристаллической решетки и сложные межфазные взаимодействия, результаты атомистического моделирования демонстрируют, что включения интерметаллидов $AlNi_3$ и Al_3Cr эффективно повышают упругие модули алюминиевой матрицы. Это делает исследуемые композиты перспективными материалами для применений, требующих сочетания легкости с повышенной прочностью и жесткостью, особенно в условиях повышенных температур.

1. Georgantzia E., Gkantou M., Kamaris G.S. Aluminium Alloys as Structural Material: A Review of Research // Engineering Structures . – 2021. – V. 227. – P. 111372.
2. Zupanič F., Klemenc J., Steinacher M., Glodež S. Microstructure, Mechanical Properties and Fatigue Behaviour of a New High-Strength Aluminium Alloy AA 6086 // Journal of Alloys and Compounds . – 2023. – V. 941. – P. 168976.
3. Pais Pereda J.J., Larionov K.V., Jiang L., Shtansky D.V., Sorokin P.B. Analysis of Stability and Mechanical Properties of Al-Cr-Fe-Co-Ni-Cu HEA Based on Machine Learning // The Journal of Physical Chemistry C . – 2024. – V. 128, No. 43. – P. 18489–18497.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУР В «УМНЫХ» ТЕКСТИЛЯХ

Ярчук А.С.,

Научный руководитель – к.т.н., директор НОЦ «Полимерные и композиционные материалы «Smart Textiles» Молоканова О.А.

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»
yarchukandrey@gmail.com

В последние десятилетия текстильная промышленность сталкивается с рядом глобальных вызовов, в числе которых — необходимость минимизации негативного воздействия на окружающую среду, переход к устойчивому развитию и повышение технологичности производственного процесса [1-2]. Современное состояние отрасли характеризуется быстрым внедрением инновационных материалов, способных изменить представление о функциональности текстильных изделий [3]. Однако их широкому внедрению препятствуют проблемы недостаточной прочности нанопокровов, сложности масштабирования технологий и отсутствия стандартизированных методов тестирования.

Современная текстильная промышленность активно развивает «умные» материалы, интегрирующие нанотехнологии и электронику. Наноматериалы (углеродные нанотрубки, графен, наночастицы металлов) придают тканям уникальные свойства: электропроводность, антимикробную защиту [1-3].

Особое внимание уделяется медицинскому текстилю с наночастицами серебра, значительно снижающим риск инфекций, а также самовосстанавливающимся и огнестойким материалам для экстремальных условий. Эти разработки находят применение в защитной одежде для промышленности и космической отрасли [4].

Перспективным направлением стали электропроводящие ткани с углеродными материалами, позволяющие создавать «умную» одежду для накопления, хранения энергии, выделения тепловой энергии и мониторинга здоровья. Такие решения особенно востребованы в медицине, спорте и оборонной сфере, открывая новые возможности для носимой электроники [5].

Метод электроформования позволяет получать нановолокна с контролируемыми свойствами, где расстояние между эмиттером и коллектором критически влияет на характеристики материала. При 10 см образуются гладкие, легко растворимые волокна, подходящие для систем контролируемого высвобождения. Уменьшение расстояния до 4 см создает сетчатую структуру с повышенной влагостойкостью благодаря усиленным межволоконным связям [5]. Эти особенности позволяют проектировать материалы с заданными свойствами для конкретных применений.

Помимо электроформования, в текстильной промышленности активно применяются другие методы модификации волокон. Химическое связывание наночастиц с текстильной основой позволяет создавать материалы с заданными свойствами, например антимикробные покрытия на основе наносеребра [6]. Другой перспективный подход – нанесение УФ-блокирующих слоев из оксидов цинка и титана, которые обеспечивают эффективную защиту от ультрафиолетового излучения [7-8]. Введение наноструктур в полимер при экструзии обеспечивает улучшение прочности, модуля, вязкости и эластичности композита за счёт равномерного распределения, возможности точной настройки параметров процесса и применения добавок для повышения адгезии [9]. Эти методы модификации открывают широкие возможности для создания функциональных текстильных материалов с улучшенными характеристиками.

Таким образом, использование нанотехнологий материалов в текстильной промышленности формирует новые стандарты качества, функциональности готовых изделий. Перспективы развития данной отрасли напрямую связаны с углублением междисциплинарных исследований, внедрением безопасных наноструктур, цифровизацией производства и широким общественным запросом на инновационные текстильные решения.

1. Атаева О.Н. Текстильная промышленность: современные тенденции и экологические вызовы // Символ науки – 2024. – (№5-2-1). – С. 27–28.
2. Щигорец Н.А. Инновационные материалы. Умный текстиль // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 4(412). – С. 21–28.
3. Самиева Ш.Х. Использование экологических чистых тканей “Smart” в женской одежде и аксессуарах // Сборник научных трудов по итогам Международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора В.Е. Зотикова, Москва, 25 мая 2022 года. – 2022 – Т. 3. – С. 5–9.
4. Самиева Ш.Х., Худайбердиева М.А., Махмудова С.Н. Умные материалы и технологии // Фундаментальные и прикладные научные исследования в области инклюзивного дизайна и технологий: опыт, практика и перспективы: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – 2022. – Т. 2 – С. 138–142.
5. Демидова М.А. Зависимость структуры и морфологии электроформованных нановолокнистых материалов от расстояния от эмиттера до коллектора // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию со дня рождения проф. Ф.Х. Садыковой. – 2023. – С. 179–183.
6. Патина, Т.Е. Дизайн современного костюма в контексте "умного текстиля": проблематика и проектные возможности // Дизайн и технологии. – 2020. – № 75(117). – С. 114–118.
7. Гарифуллина Г.А. Инновационные разработки в производстве полиэфирных волокон, применяемых для текстильных материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №19. – С. 78–82.
8. Ибатуллина, А.Р. Использование новейших нанотехнологий в изделиях текстильной промышленности // Новые технологии и материалы легкой промышленности : XVI Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых. – 2020. – С. 354–357.
9. Akhmetkhanov R.M., Sadritdinov, A.R., Zakharov, V.P., Shurshina, A.S., Kulish, E.I. Studying of Viscoelastic Properties of Secondary Polymeric Materials in the Presence of Natural Plant Based Fillers // Kondensirovannye Sredy I Mezhfaznye Granitsy Condensed Matter and Interphases. – 2020 – V. 22(1) - P. 11–17.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦ, ДОПИРОВАННЫХ ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИМИ НАНОКРИСТАЛЛАМИ

Соловьева Е.О., Лыжина Е.А., Ковова М.С.

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Старовойтов А.А.

Университет ИТМО

eugeniasoloveva11@gmail.com, lijinaliisa@gmail.com, mariakovova@mail.ru

Полимерные микрочастицы сферической формы могут служить в качестве резонаторов на основе мод шепчущей галереи, с помощью которых можно исследовать оптические эффекты в точных и контролируемых условиях. Введение в данную систему люминесцирующих нанокристаллов может не только расширить область применения таких систем, но и усилить регистрируемый сигнал. Перспективным является использование в качестве люминофора квантовых точек, поскольку они обладают высокой фотостабильностью и «настраиваемой» длиной волны излучения. Система, состоящая из полистироловых микрочастиц сферической формы, которые допированы полупроводниковыми квантовыми точками (КТ) тройных соединений $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$, может быть использована для генерации мод шепчущей галереи (МШГ), для усиления фотolumинесценции в процессах переноса энергии [1], а также в биологических исследованиях для безметочного сенсинга [2,3].

Для создания системы из полимерных микросфер с введенными в них наночастицами были отобраны КТ с различными стабилизаторами поверхности:

- 1) Олеиламин и олеиновая кислота
- 2) Полиэтиленгликоль (PEG)
- 3) Триоктилфосфин оксид (ТОРО)

В ходе синтеза полимерных микросфер для обеспечения внедрения КТ в объем происходило варьирование следующих параметров:

- 1) Время нахождения КТ в реакционной смеси
- 2) Сшивающий реагент для микросфер
- 3) Место внедрения КТ

Полученные образцы исследовались методами конфокальной лазерной микроскопии. В ходе исследования образцов микросфер, не допированных КТ, было обнаружено наличие люминесцентного сигнала, который свидетельствует о способности полученных микросфер к люминесценции. Показано наличие люминесцентного сигнала, не обнаруженного в пустых микросферах и соответствующего люминесцентному сигналу КТ. Дополнительно исследована зависимость оптических свойств использованных в работе КТ от изменения температурных условий для дальнейшего сравнения с оптическими свойствами внедренных в полимерные микросферы КТ.

В ходе работы были исследованы полистироловые микросферы, допированные различными КТ $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$. У образцов микросфер обнаружен собственный люминесцентный сигнал, что позволяет использовать их в качестве самостоятельных излучающих объектов. В допированных микрочастицах также обнаружен люминесцентный сигнал, соответствующий сигналу КТ, что свидетельствует об успешном внедрении КТ в объем микрочастиц.

Финансирование исследования выполнено за счет НИРСИИ Университета ИТМО (проект №640098, Развитие новых подходов программируемой нанофотоники на основе эффекта плазмон-индуцированной ближнепольной полимеризации).

1. Jana S. et al. Microcavity-enhanced fluorescence energy transfer from quantum dot excited whispering gallery modes to acceptor dye nanoparticles // ACS nano. – 2020. – V. 15. – №. 1. – P. 1445-1453.
2. Vollmer F., Arnold S. Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules //Nature methods. – 2008. – V. 5. – №. 7. – P. 591-596.
3. Capocefalo A. et al. Biosensing with free space whispering gallery mode microlasers //Photonics Research. – 2023. – V. 11. – №. 5. – P. 732-741.

ОДНОЭТАПНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА СТАБИЛЬНЫХ МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫХ ПЕРОВСКИТ-МОК КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК С КАТИОНОМ ФОРМАМИДИНИЯ И БУТИЛАММОНИЯ.

Матвеева Е.Д.¹, Поздняков С.В.^{2,3}, Макаров С.В.^{2,3}

Научный руководитель – Санджиева М.А.²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО,

³Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University

ed.mat0@yandex.ru

Металлогалогенидными перовскитами называют материалы с общей структурой ABX_3 , где А — органический или неорганический катион (метиламмоний (МА, CH_3NH_3), формамидиний (ФА, CH_5N_2), бутиламмоний (ВА, $C_4H_{12}N$), Cs), В — двухвалентный металл (Pb, Sn, Ge), а X — галогенид-анион (I, Br, Cl). Перовскитные материалы обладают выдающимися оптоэлектронными свойствами, включая высокий квантовый выход фотолюминесценции (ФЛ), узкую спектральную ширину излучения и возможность тонкой настройки ширины запрещенной зоны [1]. Благодаря этому перовскиты представляют значительный интерес для применения в оптоэлектронных устройствах, таких как светодиоды, фотодетекторы, лазеры и солнечные элементы [8].

Несмотря на выдающиеся свойства, металлогалогенидные перовскиты подвержены деградации под воздействием тепла, влаги и ультрафиолетового излучения, что приводит к агрегации наночастиц и потере их оптических характеристик [2]. Для повышения стабильности таких материалов исследователи применяют различные подходы, включая использование лигандов, полимерных матриц, металлоорганических каркасов (МОК), а также создание наноструктур типа «ядро–оболочка» [3–6]. Металлоорганические каркасы (МОК) представляют собой класс соединений, в которых ионы металлов и органические лиганды формируют единую кристаллическую структуру, называемую каркасом. В работе [8] был продемонстрирован пример инкапсуляции перовскитных нанокристаллов в матрицу МОК, что позволило повысить стабильность перовскитных нанокристаллов к воздействию ультрафиолетового излучения и термического нагрева. Однако оптические характеристики композитов $FAPbBr_3$ -МОК и $MAPbBr_3$ -МОК были изучены недостаточно подробно.

Целью настоящего исследования является характеристика оптических свойств композитных плёнок $FAPbBr_3$ -МОК и $MAPbBr_3$ -МОК. Металлоорганический каркас (МОК) на основе ионов свинца и тримезиновой кислоты был синтезирован сонохимическим методом [9]. Композитные перовскит-МОК пленки получены методом центрифугирования с последующим отжигом из раствора, приготовленного по новому одноэтапному методу синтеза. Для оценки толщины и шероховатости поверхности плёнок использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ). Состав композитов был подтверждён рентгеноструктурным анализом, что указывает на успешную интеграцию перовскитной фазы в структуру МОК. Измерения времен жизни фотолюминесценции ФЛ (рис.1 а) для образца $MAPbBr_3$ -МОК при росте плотности энергии от 1.3 мкДж/см^2 до 10.4 мкДж/см^2 продемонстрировали изменение с 51 нс до 24 нс; для образца $FAPbBr_3$ -МОК времена жизни ФЛ (рис.1 б) при тех же плотностях энергии изменились с 130 нс до 55 нс, что говорит о низких концентрациях дефектов в пленках, а также высокой инверсии населенностей, способствующей низким порогам усиленной спонтанной люминесценции. Измерения квантового выхода ФЛ для $MAPbBr_3$ -МОК (рис.1 в, зеленая линия) продемонстрировали максимальные значения 36 % при плотности мощности 11 Вт*см^{-2} , при этом значения квантового выхода ФЛ с повышением плотности мощности накачки убывает, что говорит о повышении вклада нерадиационных рекомбинационных процессов. Измерения квантового выхода ФЛ для $FAPbBr_3$ -МОК (рис.1 в, оранжевая линия) продемонстрировали максимальные значения 42.4 % при плотности мощности 1 Вт*см^{-2} , однако в сравнении с предыдущим образцом значения квантового выхода

ФЛ с повышением плотности мощности накачки возрастает, что говорит о повышении вклада радиационных процессов рекомбинации.

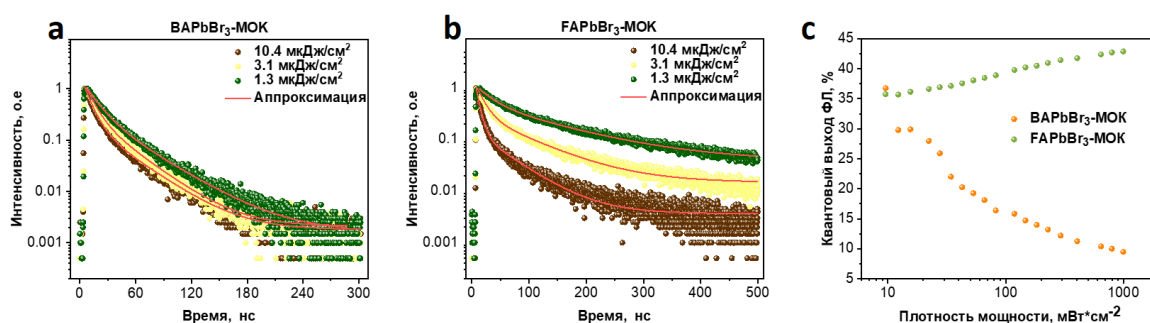


Рисунок 1. Оптические измерения композитных пленок VAPbBr₃-MOK и FAPbBr₃-MOK. а) Кривые затухания ФЛ VAPbBr₃-MOK при растущей плотности энергии. б) Кривые затухания ФЛ FAPbBr₃-MOK при растущей плотности энергии. в, Зависимости квантовых выходов ФЛ VAPbBr₃-MOK и FAPbBr₃-MOK от плотности мощности.

1. Akkerman Q. A., Manna L. What defines a halide perovskite? //ACS energy letters. – 2020. – V. 5. – №. 2. – P. 604-610.
2. Manser J. S., Christians J. A., Kamat P. V. Intriguing optoelectronic properties of metal halide perovskites //Chemical reviews. – 2016. – V. 116. – №. 21. – P. 12956-13008.
4. Quan L. N. et al. Ligand-stabilized reduced-dimensionality perovskites //Journal of the American Chemical Society. – 2016. – V. 138. – №. 8. – P. 2649-2655.
5. Cao Q. et al. Efficient and stable inverted perovskite solar cells with very high fill factors via incorporation of star-shaped polymer //Science Advances. – 2021. – V. 7. – №. 28. – P. eabg0633.
6. Ye Y. et al. Metal-organic framework materials in perovskite solar cells: recent advancements and perspectives //Small. – 2023. – V. 19. – №. 25. – P. 2208119.
7. Zhang C. et al. Core/shell metal halide perovskite nanocrystals for optoelectronic applications //Advanced Functional Materials. – 2021. – V. 31. – №. 19. – P. 2100438.
8. Sutherland, Brandon R., and Edward H. Sargent. Perovskite photonic sources. //Nature Photonics – 2016. – V. 10. – №5 – P. 295-302.
9. Sun Y. et al. Bright and stable perovskite light-emitting diodes in the near-infrared range //Nature. – 2023. – V. 615. – №. 7954. – P. 830-835.
10. Xu H., Zeiger B. W., Suslick K. S. Sonochemical synthesis of nanomaterials //Chemical Society Reviews. – 2013. – V. 42. – №. 7. – P. 2555-2567.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОРИСТЫХ ПЛАЗМОННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СЕНСОРОВ

Буев И.Д.¹, Мурзич С.К.², Андреев А.А.³, Мифтахов А.Р.⁴

Научный руководитель – аспирант Никитин И.Ю.

¹ ГБОУ средняя школа №511 Пушкинского района г. Санкт-Петербурга

² ГБОУ средняя школа № 345 Невского района г. Санкт-Петербурга

³ Государственное автономное общеобразовательное учреждение «Губернаторский многопрофильный лицей-интернат для одарённых детей Оренбуржья»

⁴ Школа номер 75 с углубленным изучением немецкого языка
Ilya.b.study@gmail.com

Введение.

Поиск новых материалов для применения в качестве прозрачных электродов в дисплеях и солнечных батареях является актуальной научной задачей вследствие значительного роста цен на традиционный для этих целей оксид индия-олова (ITO) [1]. Нанопористый алюминий является достойной альтернативой данному соединению благодаря низкой стоимости и оптической прозрачности при создании тонких плёнок [2, 3].

При анодировании алюминия наращивается оксидный слой двух типов: барьерного, образующего сплошной ровный слой, и пористого, состоящего из множества упорядоченных углублений. Если сравнить барьерный слой, создающий помехи для протекания тока, и оставить пористый, то на полученном образце можно будет наблюдать индуктивно-резонансный перенос энергии, увеличивающий интенсивность люминесцентного сигнала аналита [4]. Это открывает перспективы для использования анодного оксида алюминия в люминесцентных сенсорах.

Цели и задачи.

Целью проекта является создание полупрозрачного электрода на основе нанопористой алюминиевой пленки. Перед выполнением проекта были поставлены следующие задачи:

1. Литературный обзор;
2. Напыление алюминия методом магнетронного напыления;
3. Моделирование спектра отражения для контроля времени анодирования;
4. Проведение анодирования полученных алюминиевых пленок;
5. Травление барьерного слоя оксида, находящегося на дне оксидных пор и препятствующего протеканию тока;
6. Регистрация спектров пропускания при различном времени травления;
7. Репликация спектров в калькуляторе пропускания, получение данных о толщинах пористого и барьерного слоёв оксида;
8. Измерение проводимости алюминиевой пленки.

Методы.

Плёнки алюминия были нанесены методом магнетронного напыления в 3 этапа: ликвидация оксидной плёнки на мишени, нанесение адгезионного оксидного слоя и напыление алюминия.

Далее проводилось потенциостатическое анодирование образцов в 0,3М щавелевой кислоте при температуре 24°C. Установка прекращала процесс при достижении порогового значения коэффициента отражения белого света от образца (0,812). Данное значение было получено благодаря моделированию спектра отражения при толщине алюминиевого слоя в 20 нм, так как при подобной толщине коэффициент усиления хемолюминесценции максимален [5].

Следующим этапом было травление плёнок в 6% растворе ортофосфорной кислоты при температуре 5°C. Первый образец погружался в кислоту последовательно с интервалами в 10 минут в течение часа, благодаря чему на нём образовалось 7 зон с временами травления от 0

до 60 минут. Второй образец погружался целиком, каждые 5 минут проводились сушка и измерение проводимости мультиметром.

Первый образец был использован для регистрации спектров пропускания на каждой из зон с целью их последующей репликации в оптическом калькуляторе и получения данных о толщинах барьерного и пористого слоёв оксида алюминия.

При помощи 4-х контактного омметра со второго образца снимались данные о поверхностном сопротивлении плёнки. Также для сравнения эти показания были получены и для плёнки ИТО.

Результаты.

После 30 минут травления на графиках, полученных с первого образца, произошли существенные изменения в пропускании, связанные с растворением барьерного слоя оксида алюминия. Репликация спектров в оптическом калькуляторе позволила построить зависимость толщины нанопористого слоя от времени травления, оказавшуюся линейной регрессией. Эти данные позволяют точно производить травление анодного оксида алюминия для люминесцентных сенсоров, настроенных на определённую длину волны.

Второй образец показал значительное меньшее поверхностное сопротивление относительно ИТО, 2,55 Ом/см² против 113,05 Ом/см², что делает его более перспективным кандидатом на роль прозрачного электрода.

Вывод.

Алюминиевые пленки являются достойной альтернативой оксиду индия-олова, являясь более доступным материалом, обладающим высокой проводимостью и оптической прозрачностью. Они могут быть использованы в солнечных батареях, экранах и люминесцентных сенсорах.

1. Angmo D., Krebs F.C. Flexible ITO-free polymer solar cells // J. Appl. Polym. Sci.. - 2013. - №129. - P. 1-14.
2. Li Y., Chen Y., Qiu M. et al. Preparation of Aluminum Nanomesh Thin Films from an Anodic Aluminum Oxide Template as Transparent Conductive Electrodes // Sci Rep. - 2016. - №6. - P. 20114.
3. Tsutomu Nakanishi et al Transparent Aluminum Nanomesh Electrode Fabricated by Nanopatterning Using Self-Assembled Nanoparticles // Appl. Phys. Express. - 2011. - №4. - P. 025201.
4. I. Yu. Nikitin et. al Förster resonant energy transfer from alumina luminescence centers to dye molecules adsorbed in anodic alumina thin films used as coatings and in sensors // Optical Materials. - 2025. - №160
5. Petrov N.S. et. al Periodically perforated aluminum film for enhancing chemiluminescence // Optics and Spectroscopy. - 2025. - №133. - P. 100–106

ПОЛУЧЕНИЕ ТОНКИХ ПРОВОДЯЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОРИСТОЙ ПОДЛОЖКЕ

Бриль И.И.^{1,2}

Научный руководитель – к.т.н., Воронин А.С.

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана»
ellaijiah@gmail.com

В последние годы новый класс электронных устройств на основе гибких пористых подложек привлекает всё большее внимание благодаря своему потенциальному революционному применению в мягкой робототехнике, нейроинтерфейсах, имплантируемой биоэлектронике, а также в устойчивом сборе и хранении энергии. Как правило, эти устройства представляют собой паттерн из функционального проводящего слоя на подложке. В качестве подложек может использоваться бумага, полимеры, ткани и подобные материалы. Проводящим слоем могут служить различные проводящие пленки из металлов, графена, наночастиц и других наноматериалов [1]. Технологии нанесения функциональных слоев, такие как осаждение, печать, напыление не позволяют добиться высокой адгезии к подложке. В этой работе мы демонстрируем подход лазерно — индуцированной интеграции серебряных нанопроволок (AgNW) в пористый фильтр на основе ацетата целлюлозы для создания гибких проводящих функциональных композитов.

Мы синтезировали AgNW с помощью сольвотермального метода. Подробнее о синтезе в работе [2]. Полученные проволоки мы охарактеризовали с помощью СЭМ и спектроскопии UV-VIS-NIR. На рисунке 1а мы видим спектр оптического поглощения суспензии AgNW в этаноле. Мы видим широкий пик и сателлит начинающиеся с 318 нм и продолжающийся вплоть до завершения спектра. Пик и сателлит связаны с возбуждением плазмонного резонанса, а его ширина с неоднородностью распределения длин AgNW (рис.1а - вставка). Затем мы нанесли AgNW из дисперсий на фильтры марки ФМ. с помощью фильтрационной установки. Полученные пленки мы обработали микросекундным лазером с длиной волны 432 нм (рис.1б) Длина волны была выбрана исходя из максимума пика поглощения, расположенного на 432 нм. Затем мы обработали полученные образцы с помощью погружения их в ультразвуковую ванну (УЗ-ванну) на 30 секунд, для удаления неинтегрированных AgNW и оценке износостойкости.

Полученные композиты мы охарактеризовали с помощью СЭМ. На рис. 1в мы видим вставки с СЭМ-изображениями, на которых показана интеграция AgNW в фильтр. На снимках отчетливо видна интеграция AgNW в толщу фильтра.

Мы также изучили электрические свойства полученных композитов. На рис. 1г мы видим зависимость поверхностного сопротивления от энергии лазера на один импульс. Видно, что оптимум находится между 0.15 и 0.35 Дж. При более высокой энергии фильтр разрушается из-за высокой температуры при возбуждении плазмонного резонанса. Так же на этом рисунке мы видим поверхностное сопротивление композитов после обработки в УЗ-ванне. Мы видим увеличение сопротивления порядка 50%. Это связано с удалением не интегрированных AgNW.

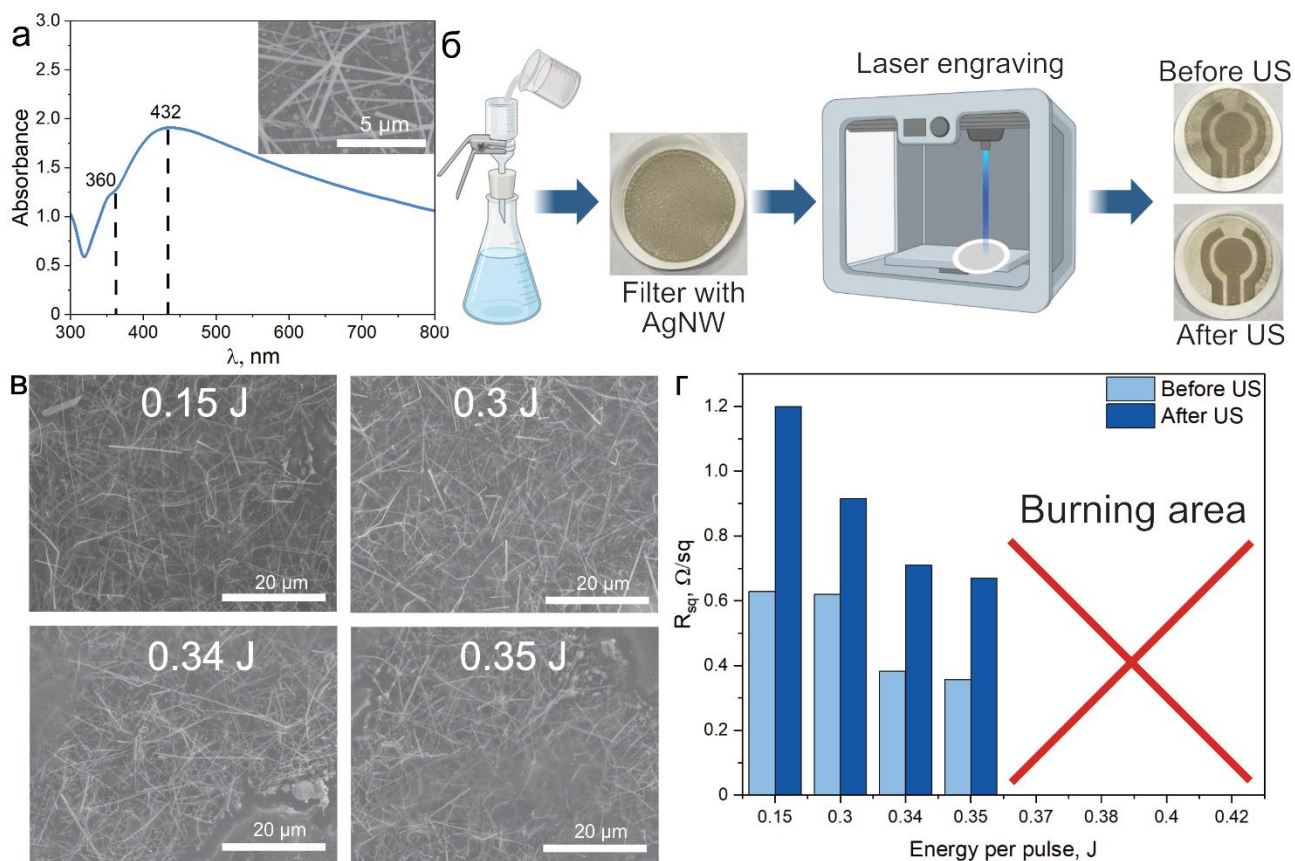


Рис.1 – а. спектр оптического поглощения AgNW в UV-VIS диапазоне; б – технологическая схема изготовления образцов; в – СЭМ-изображения участков образцов, обработанных лазером при различных энергиях на импульс; г – поверхностное сопротивление образцов, полученных на различных энергиях на импульс, до и после ультразвуковой обработки.

Лазерно-индуцированный подход позволяет создавать проводящие пористые композиты с функциональным слоем из AgNW. В этой работе мы продемонстрировали такой композит на пористом фильтре из ацетата целлюлозы. Полученный материал был охарактеризован с точки зрения морфологии и электрических свойств. Полученные результаты говорят о высокой перспективе применимости подхода для создания материалов для современных направлений гибкой и пористой электроники

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2024-0016)

1. Y. Zhang, T. Zhang, Z. Huang, J. Yang, A New Class of Electronic Devices Based on Flexible Porous Substrates // *Advanced Science*. – 2022, – 9, 2105084.
2. Bril', I.; Voronin, A.; Fadeev, Y.; Pavlikov, A.; Govorun, I.; Podshivalov, I.; Parshin, B.; Makeev, M.; Mikhalev, P.; Afanasova, K.; et al. Laser-Induced Silver Nanowires/Polymer Composites for Flexible Electronics and Electromagnetic Compatibility Application // *Polymers* –2024, – 16, – 3174.

КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Оловяnnиков Г.А., Фомина П.А., Булыгин Е.А., Попов И.А., Грицаева А.В.

Научный руководитель – к. ф. -м. н., доц. Козлов В.А.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

gr.olovyannikov@gmail.com

Актуальность исследования обусловлена растущими требованиями к современным биомедицинским материалам, сочетающим биосовместимость, антибактериальную активность и управляемую деградацию в биологических средах. Создание композитов на основе поликапролактона (PCL) с введением неорганических наночастиц открывает перспективы для разработки перевязочных материалов нового поколения, способных эффективно предотвращать инфекции и поддерживать регенерацию тканей, одновременно снижая риск накопления неразлагаемых полимерных отходов. Такие материалы могут найти применение в тканевой инженерии, системах доставки лекарств и качестве временных имплантатов, что делает исследование значимым для решения ключевых задач современной медицины и экологии [1-3].

В настоящей работе был разработан метод получения композитов на основе поликапролактона с введёнными неорганическими наночастицами оксидов металлов (Ag_2O , CuO) в малых концентрациях – 0,012 г/л (0,001 мас.%). Размерно-концентрационные характеристики оценивались методом динамического рассеяния света. Сравнительный анализ физико-химических параметров полученных композитов выполнен посредством ИК-спектроскопии Фурье в интервале 400-4000 см^{-1} . Топография поверхности изучена с использованием модуляционно-интерференционной микроскопии. Оценку биологической совместимости провели на культуре фибробластов человека (HSF), задействовав МТТ-анализ для фиксации метаболического статуса и люминесцентную микроскопию для количественного определения жизнеспособных клеточных единиц.

Дихлорметан способствует снижению размера агломератов частиц в дисперсии и обеспечивает их равномерное распределение в матриксе. Минимальные отклонения, вызванные взаимодействием функциональных групп, свидетельствуют о совместимости компонентов. Образцы с наночастицами CuO демонстрируют наиболее выраженный рост коэффициента набухания во времени, что связано с увеличением количества активных зон взаимодействия с водой и усилением капиллярного проникновения. При этом модификация Ag_2O не проявляет значительной активности на ранних этапах, однако к 24 часам наблюдается заметное набухание, вероятно, вследствие изменения структуры на поверхности или частичного выщелачивания ионов. Установлено, что исследуемые композиты не обладают выраженной цитотоксичностью.

Предложенные PCL-композиты, модифицированные наночастицами оксидов металлов, перспективны для практического применения в биомедицине в качестве мягких рассасывающихся скаффолдов, шовных материалов и покрытий для временных имплантатов.

1. Mosallanezhad P. et al. Fabrication and characterization of polycaprolactone/chitosan nanofibers containing antibacterial agents of curcumin and ZnO nanoparticles for use as wound dressing //Frontiers in bioengineering and biotechnology. – 2022. – V. 10. – P. 1027351.
2. Pedrosa M. C. G. et al. Structure and biological compatibility of polycaprolactone/zinc-hydroxyapatite electrospun nanofibers for tissue regeneration //Journal of Bioactive and Compatible Polymers. – 2021. – V. 36. – №. 4. – P. 314-333.
3. Balan R., Gayathri V. In-vitro and antibacterial activities of novel POT/ TiO_2 /PCL composites for tissue engineering and biomedical applications //Polymer Bulletin. – 2022. – V. 79. – №. 6. – P. 4269-4286.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА ОПТОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С БИСТАБИЛЬНОЙ ДИНАМИКОЙ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ ЛОВУШКИ

Соболева Е.В., Рудый С.С., Иванов А.В.

Научный руководитель – к. ф.-м. н., доцент Иванов А.В.

Национальный исследовательский университет ИТМО

eliz.sobol239@gmail.com

Для решения задач класса сложной комбинаторной оптимизации, которые широко встречаются в промышленности, создаются квантововдохновленные подходы. Существуют различные платформы для их реализации, основанные на нелинейных динамических системах с атомами и ионами, кристаллами, квантовыми точками, сверхпроводниками, а также системах на нелинейных осцилляторах Дюффинга [1]. Важную роль в создании таких платформ для решения оптимизационных задач играет контролируемая бистабильность состояний нелинейной динамической системы. Бистабильная динамика регулируется внешним управляющим параметром системы. [2-3]. Изменение управляющего параметра позволяет переводить динамическую систему из состояния с одной устойчивой точкой равновесия в состояние с двумя устойчивыми точками, характеризующими положение частицы в пространстве ловушки. Наличие бистабильной динамики в системе открывает возможность использования такой системы в качестве физической реализации машины Изинга, которая является одной из платформ для решения задач сложной оптимизации [4].

Для создания платформы, реализующей машину Изинга, предложена гибридная ловушка [5], использующая одновременно лазерное излучение и радиочастотное поле для удержания и манипулирования заряженными микро- и наночастицами. Настоящая работа посвящена теоретическому описанию эффективного бифуркационного потенциала такой платформы и исследованию динамики заряженной микрочастицы в гибридной ловушке. Для управления бифуркацией устойчивых положений частицы в ловушке произведен анализ динамической системы, и определен управляющий параметр системы, представляющий функциональную зависимость от параметров поля и геометрии ловушки, свойств частицы и среды, а также лазерного излучения.

В работе продемонстрировано управление пространственной бифуркацией положений частицы с помощью лазера в гибридной ловушке, при которой параметр бифуркации аналитически связан с мощностью лазера и геометрией ловушки. В результате работы произведен переход от трехмерной задачи описания эффективного потенциала системы к одномерной задаче зависимости потенциала от координаты y устойчивых положений частицы. Для наглядного описания динамики микрочастицы в гибридной ловушке эффективный потенциал был усреднён и разложен в ряд Тейлора. В результате получено аналитическое приближение этого потенциала в виде одномерной модели, аналогичной осциллятору Дюффинга, где a и b – параметры:

$$U(y) = \frac{ay^2}{2} + \frac{by^4}{4}. \quad (1)$$

Анализ одномерного потенциала позволил определить управляющие параметры, определяющие пространственную бифуркацию. Установлены соотношения между физическими параметрами гибридной ловушки и коэффициентами одномерного потенциала типа Дюффинга. Амплитуда напряжения на электродах и мощность лазера определены как ключевые факторы, позволяющие достичь управляемую пространственную бифуркацию, поскольку их значения могут точно регулироваться в процессе удержания частицы. Показано, что динамическая система на основе гибридной ловушки демонстрирует бифуркацию типа вилки, что полностью согласуется с моделью Дюффинга (1). Предложен метод расчёта критических значений параметров бифуркации.

В данной работе представлена новая оптомеханическая система, основанная на микрочастице в гибридной ловушке, которая обладает бистабильностью и возможностью

управления бифуркацией. Полученные результаты показывают, что предложенная система может служить перспективной платформой для реализации физических решателей задач оптимизации, включая машины Изинга на основе нелинейных динамических систем.

- 1 Reifenstein S., Leleu T., McKenna T. et al. Laser-Controlled Spatial Bifurcation in Hybrid Traps // *Advances in Optics and Photonics* . – 2023. – V. 15. – P. 385–441.
Reifenstein S., Leleu T., McKenna T. et al. Laser-Controlled Spatial Bifurcation in Hybrid Traps // *Advances in Optics and Photonics* . – 2023. – V. 15. – P. 385–441.
- 2 Böhm F., Vaerenbergh T., Verschaffelt G. et al. Optomechanical Systems for Nonlinear Dynamics // *Communications Physics* . – 2021. – V. 4. – P. 149.
- 3 Leleu T., Utsunomiya U., Aihara K. Bifurcation Control in Optical Systems // *Physical Review* . – 1995. – Paper No. 022118. Kobayashi T. J-Aggregates. – Singapore: World Scientific, 1996. – 228 p.
- 4 Böhm F., Verschaffelt G., Van der Sande G. Optical Control of Trapping Potentials // *Nature Communications* . – 2019. – V. 10. – P. 3538.
- 5 Colin D., Chiaverini J., McConnell R. et al. Advances in Hybrid Trapping Technologies // *Applied Physics Reviews* . – 2019. – V. 6 (2). – P. 021314.