



**ВНКСФ-28**

**г. Новосибирск**

**Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция  
студентов-физиков и молодых ученых**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

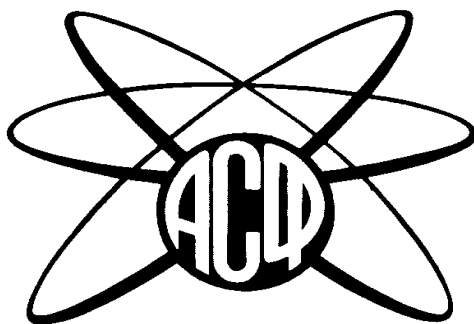
**1 - 6 апреля 2024 года**

**Новосибирск**

**Ассоциация студентов-физиков и молодых учёных России**  
**Институт электрофизики УрО РАН**  
**Сибирское Отделение Российской академии наук**  
**Новосибирский государственный университет**  
**Институт гидрофизики им. М.А. Лаврентьева СО РАН**  
**Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН**  
**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН**  
**Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН**  
**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН**  
**Институт физики Южного Федерального университета**  
**при участии:**  
**Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН**

**В Н К С Ф – 28**

**Двадцать восьмая Всероссийская  
научная конференция студентов-физиков и молодых учёных**



**Россия**

**Материалы конференции  
Информационный бюллетень**

**Новосибирск  
2024**

РИНЦ:  
ISBN 978-5-93667-204-0  
УДК 53 ББК 22.3

**ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК:**  
**Александр Арапов**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Связь по интернет, общее редактирование:** Александр Арапов (Екатеринбург)

**Обработка содержательной части тезисов по секциям:** научные секретари – эксперты секций - члены научного комитета конференции ВНКСФ-28, данные о которых напечатаны в разделе «*Состав научного комитета конференции ВНКСФ-28*», *страницы 17- 20*

**Компьютерная верстка, редактирование:** Арапов Александр, Арапова Елизавета, Бураева Елена (Ростов-на-Дону), Исламов Дамир (Новосибирск).

**Составление первой части сборника:** Арапов Александр.

**Дизайн:** Кайгородова Ольга (Екатеринбург), Александр Арапов

**Обработка и создание базы данных, флэш-диск:** Арапова Елизавета, Арапов Александр.

**Поддержка сайта:** Александр Арапов.

**Программирование, автоматизация:** Алексей Исаков (Екатеринбург), Елизавета Арапова.

**Сборник тезисов, материалы Двадцать восьмой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-28, Новосибирск):** материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т. Т.1 – Новосибирск, издательство АСФ России, 2024.

В сборнике представлены тезисы докладов, посвященных различным аспектам современной физики, представленные на Двадцать восьмой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, проходившей в г. Новосибирске, ДСОЛ «Юбилейный», Институтах СО РАН Новосибирского научного центра (Академгородок) и НГУ с 1 по 6 апреля 2024 г., а также итоги конференции ВНКСФ-27, статистические данные.

**230** тезисов, **356** страниц формата А4. Копия сборника на флэш-диске с персональными анкетами и фото участников конференции, а также архивы конференций ВНКСФ: 11-27 прилагается. С публикацией на сайте [http://asf.ural.ru/VNKSF/Tezis/tezis\\_v28.html](http://asf.ural.ru/VNKSF/Tezis/tezis_v28.html)

Сборник предназначен для преподавателей, аспирантов, студентов, научных работников и прочих интересующихся современной физикой людей, работающих в области физических наук и смежных с нею областях.

**ВНКСФ-28 проводилась при поддержке: Новосибирского государственного университета, Сибирского отделения РАН, Института гидродинамики СО РАН, ООО «Научные приборы и системы» (г. Новосибирск), Института электрофизики УрО РАН, ветеранов Ассоциации студентов-физиков и молодых учёных России.**

Оргкомитет конференции выражает благодарность всем ученым-физикам Новосибирского научного центра и Российской Федерации за активное участие в конференции!

Выражаем также персональную признательность: - академику РАН, научному руководителю Института теплофизики СО РАН **Алексеев Сергею Владимировичу**; - профессору РАН, декану механико-математического факультета НГУ **Марчуку Игорю Владимировичу**; - директору Института гидродинамики СО РАН **Ерманюку Евгению Валерьевичу**; - директору Института лазерной физики СО РАН **Шайхисламову Ильдару Фаритовичу** за личное участие в программе конференции, а также академику РАН **Асееву Александру Леонидовичу** и академику РАН, ректору НГУ **Федоруку Михаилу Петровичу** за содействие в проведении ВНКСФ-28.

© Новосибирский государственный университет, 2024 г.

© Ассоциация студентов – физиков и молодых ученых России, 2024 г.

Екатеринбург – Новосибирск. тел: (923) 422-74-34, e-mail: [asf@asf-ur.ru](mailto:asf@asf-ur.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ:

ВНКСФ -28. Возвращение в Сибирь.....	5
--------------------------------------	---

### Мероприятия АСФ России в 2023 году:

Официальные итоги конференции ВНКСФ-27.....	6
---	---

### Общая информация о конференции ВНКСФ-28:

Состав оргкомитета ВНКСФ-28 .....	14
Состав программного комитета ВНКСФ-28 .....	16
Состав научного комитета ВНКСФ-28 и приглашенных лекторов .....	17
График работы секций и визитов ВНКСФ-28.....	21
Пленарная программа (школа ВНКСФ-28) .....	24
Программа визитов ВНКСФ-28.....	27
Статистика заявок, докладов и участия ВНКСФ-28 по секциям .....	29
Статистика заявок, докладов и участия ВНКСФ-28 по городам.....	30
Статистика конференций ВНКСФ 25-28 (пост-ковидный период) .....	32
Статистика всех конференций ВНКСФ 1-27.....	33

### Тезисы участников конференции ВНКСФ-28:

Тезисы участников конференции с данными о каждом участнике конференции по секциям:	
01-Теоретическая физика, математическая физика.....	35
02-Физика конденсированного состояния вещества .....	45
03-Физика полупроводников и диэлектриков.....	77
04-Физика атомного ядра и элементарных частиц. Физика высоких энергий. ....	97
05-Электрофизика, электрофизические установки. Физика плазмы, плазменные технологии. ....	103
06-Магнетизм. ....	115
07-Оптика и спектроскопия .....	135
08-Квантовая электроника и лазерная физика .....	167
09-Физическая химия, химическая физика .....	171
10-Астрофизика, физика космоса, современные и перспективные космические исследования и технологии.....	193
11-Биофизика, медицинская физика .....	199
12-Геофизика: земная кора, океан, атмосфера.....	215
14-Статистическая механика жидкости, газа и плазмы. Молекулярная физика. ....	227
15-Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика .....	231
16-Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты.....	245
17- Радиофизика. Электроника.....	267
18-Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях .....	303
19-Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена.....	323
20-Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике.....	335
21-Проблемы и методологии преподавания физики .....	345
Список докладов школьной секции .....	353
Алфавитный указатель сборника по участникам конференции .....	354







## **ВНКСФ - 28. Возвращение в Сибирь!**

Последний раз наша конференция **ВНКСФ под №24 проводилась в Сибири в Томске в 2018 году**, Сколько же всего произошло за это время: на следующий год ВНКСФ-25 была проведена в Крыму, в Севастополе. В 2020 году ВНКСФ планировалась в Магнитогорске, но за 2 недели до её начала пришла эпидемия ковида. ...после этого ВНКСФ не проводилась 4 года. И только в прошлом году нам удалось провести ВНКСФ-27 в Екатеринбурге. Она была проведена всего за 4 дня, а приехало всего ...50 человек.

Сейчас нашу конференцию приходится, по сути, воссоздавать заново. И это очень непростая задача. И именно поэтому многие из её организаторов считали правильным провести следующую ВНКСФ там, где есть наибольшая "концентрация" физиков, где мы сможем оказаться, с одной стороны, как бы "среди своих", а, с другой стороны, развитый центр науки в области физики сможет привлечь дополнительное внимание потенциальных участников конференции. Долго рассуждать не пришлось, - почти все сразу подумали ...да - о Новосибирском академгородке!

И в самом деле, это одно из самых уникальных мест в России с потрясающей историей! В короткое время, менее чем за 10 лет, с 1957 по 1967 год, в Сибири возник город, аналогов которому в то время ещё не существовало в стране. Эксперимент по формированию крупного научно-образовательного и промышленного центра сопровождался градостроительным экспериментом, внедрением принципов экологического проектирования, созданием интегрированной среды обитания, сочетающей элементы дикой природы и традиционных городских построек. Академгородок в дальнейшем послужил образцом для проектирования значительного числа наукоградов в разных регионах страны и за рубежом.

Но основной эксперимент был даже не в самом городе, а в сочетании, взаимодействии и развитии одновременно трех направлений: науки, образования и внедрения новых технологий в промышленность. Здесь особый университет, работающий по "принципам физтеха", здесь необыкновенная концентрация науки: 30 институтов из них 20 работающих в области физических исследований. Здесь, сейчас работает Технопарк и строится Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ). Из населения 75000 человек около 90 % работает в сфере науки и образования.

Во время конференции её участники смогут узнать более подробно о героической истории создания Академгородка и Сибирского отделения АН СССР, посетить с визитами целый ряд институтов, лабораторий и уникальных установок. А на самой конференции планируются выступления ведущих учёных Новосибирского научного центра. Мы уверены, что эти визиты и вообще все темы, связанные с наукой и особенно физикой в Академгородке никого не оставят равнодушными и запомнятся на всю жизнь...

Вообще же, за всю историю ВНКСФ, она проводилась в Сибири **7 раз**: - **два раза в Томске**: ВНКСФ-6 (2000), ВНКСФ-23 (2018); - **два раза в Красноярске**: ВНКСФ-9 (2003), ВНКСФ-18 (2012); - **один раз в Кемерово**: ВНКСФ-15 (2009), **один раз в Омске**: ВНКСФ-21 (2015) и **один раз в Новосибирске**: **ВНКСФ-12 в уже далеком 2006 году!** То есть мы здесь не были 18 лет! **И не смотря на это, на сотрудничество в проведении ВНКСФ-28 согласились 7 институтов и университет! И за это нашим коллегам - огромное спасибо!**

Основная программа конференции будет проходить с 1 по 6 апреля 2024 года в Детском санаторно-оздоровительном лагере «Юбилейный», который находится по одной линии с юга на север: - **в 5 км от центра города Бердск**, - **17 км от Академгородка** и **40 км от центра Новосибирска** в сосновой лесной местности, на берегу небольшого залива речки Раздельная при её впадении в Обь. В это время года в Сибири еще сохраняется снежный покров и лёд. Так что те, кто не успел или вообще не видел зиму, - здесь еще успеют её застать: покататься на лыжах, санях и коньках.

**Добро пожаловать в Сибирь! Добро пожаловать в Новосибирский Академгородок!**

## 2. Физика конденсированного состояния вещества

### Студенты младших курсов



*Диплом I степени*

**Гусейнов Тимур Забитович**, 4 курс

Ижевск, Удмуртский государственный университет, институт математики, факультет информационных технологий и физики

**Определение скорости распыления тонких пленок Co и Cr методом послыонного профилирования**

Бакиева Ольга Ринатовна, к.ф.-м.н., e-mail: [ftiran@mail.ru](mailto:ftiran@mail.ru)

### Студенты старших курсов



*Диплом II степени*

**Фоминых Богдан Михайлович**, 5 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физико-технологический институт

**Электронные транспортные свойства топологического полуметалла PtSn<sub>4</sub>**

Марченков Вячеслав Викторович, д.ф.-м.н., e-mail: [fominikh@imp.uran.ru](mailto:fominikh@imp.uran.ru)

### Аспиранты и молодые ученые



*Диплом I степени*

**Астафьев Павел Андреевич**, аспирант 4 года обучения

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет

**Резонансные свойства антисегнетоэлектриков в СВЧ диапазоне**

Резниченко Лариса Андреевна, д.ф.-м.н., e-mail: [l.b.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru](mailto:l.b.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru)

## 3. Физика полупроводников и диэлектриков

### Студенты старших курсов



*Онлайн участие. Диплом I степени*

**Трофимов Михаил Сергеевич**, магистрант 2 года обучения

Томск, Томский государственный университет, радиофизический

**Транспорт неравновесных носителей заряда в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом**

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [mihant1999@yandex.ru](mailto:mihant1999@yandex.ru)

### Аспиранты и молодые ученые



*Онлайн участие. Диплом II степени*

**Краснова Ирина Андреевна**, аспирант 1 года обучения

Новосибирск, Институт физики полупроводников СО РАН

**Пассивирующие свойства пленок HfO<sub>2</sub> в зависимости от температуры осаждения на поверхность CdHgTe**

Сидоров Георгий Юрьевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [krasnovaia@isp.nsc.ru](mailto:krasnovaia@isp.nsc.ru)

#### 4. Физика атомного ядра и элементарных частиц

##### Студенты старших курсов



*Диплом I степени*

**Антохина Ксения Витальевна**, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Черенковское излучение в мишенях с нарушенной азимутальной симметрией**  
Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н., e-mail: [kantohina@sfedu.ru](mailto:kantohina@sfedu.ru)

#### 5. Электрофизика, электрофизические установки. Физика плазмы, плазменные технологии

##### Студенты младших курсов



*Диплом I степени*

**Параскун Александр Григорьевич**, 3 курс  
Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический  
**Изготовление трансформатора Тесла на основе фундаментальных физических законов и уравнений Кирхгофа**  
Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н., e-mail: [a.paraskun@ngsu.ru](mailto:a.paraskun@ngsu.ru)

##### Аспиранты и молодые ученые

*Онлайн-участие. Диплом I степени*



**Фролова Валерия Петровна**, н.с.  
Томск, Институт сильноточной электроники СО РАН  
**Магнетрон с нагреваемой в разряде мишенью для формирования многокомпонентных покрытий на основе бора**  
Юшков Георгий Юрьевич, д.т.н., e-mail: [Frolova\\_Valeria\\_90@mail.ru](mailto:Frolova_Valeria_90@mail.ru)



*Диплом II степени*

**Андронов Артем Андреевич**, аспирант, инженер  
Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, факультет электронной техники  
**Синтез диэлектрических покрытий на основе циркониевой керамики с помощью форвакуумного плазменного источника электронов**  
Юшков Юрий Георгиевич, д.т.н., e-mail: [artem.andronov.98@bk.ru](mailto:artem.andronov.98@bk.ru)

#### 6. Магнетизм

##### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*



**Богуславский Лев Георгиевич**, 3 курс  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, институт естественных наук и математики  
**Анализ топологической структуры плоскостной компоненты векторного поля систем магнитов**  
Иванов Владимир Елизарович, к.ф.-м.н., e-mail: [lev.bog12@gmail.com](mailto:lev.bog12@gmail.com)

## Аспиранты и молодые ученые

*Диплом III степени*



**Тимофеева Анастасия Владимировна**, м.н.с.

Екатеринбург, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, отдел магнитных материалов

**Влияние термомагнитной обработки на свойства магнитомягких сплавов Fe-Ge**

e-mail: [timofeeva\\_av@imp.uran.ru](mailto:timofeeva_av@imp.uran.ru)

## 7. Оптика и спектроскопия

### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*



**Сидко Сергей Сергеевич**, 3 курс

Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий

**Колебательно-вращательная спектроскопия высокого разрешения полосы  $\nu_2+\nu_3$  молекулы метилхлорида  $\text{CH}_3\text{Cl}$ : энергетическая структура и абсолютные интенсивности линий**

Уленков Олег Николаевич, д.ф.-м.н., e-mail: [sss60@tpu.ru](mailto:sss60@tpu.ru)

*Диплом II степени*



**Гаппель Екатерина Витальевна**, 3 курс

Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий

**Исследование характеристик поглощения сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$  ( $M=32,33,34$ ) в районе первой декады: положения линий и коэффициенты самоуширения**

Бехтерева Елена Сергеевна, д.ф.-м.н., e-mail: [Katya\\_gappel@mail.ru](mailto:Katya_gappel@mail.ru)

*Диплом III степени*



**Вэн Линь**, 4 курс

Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий

**Аналитические вычисления для многоатомных молекул на основе операторной теории возмущений: асимметричный волчок**

Уленков Олег Николаевич, д.ф.-м.н., e-mail: [645924723@qq.com](mailto:645924723@qq.com)

### Студенты старших курсов

*Диплом II степени*



**Арсланов Кирилл Павлович**, 6 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физико-технологический институт

**Оптические спектры расплавов  $x\text{Na}_2\text{O}-(100-x)\text{B}_2\text{O}_3$**

Хохряков Александр Александрович, д.х.н., e-mail: [arslanov.kirill@mail.ru](mailto:arslanov.kirill@mail.ru)

## Аспиранты и молодые ученые



*Диплом I степени*

**Еремкин Егор Валерьевич**, аспирант 1 года обучения  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, институт инженерной физики и радиоэлектроники

**Развитие гибридной модели для расчета плазмонов с переносом заряда в комплексных системах**

Федоров Александр Семёнович, д.ф.-м.н., e-mail: [eremkin.e.v@yandex.ru](mailto:eremkin.e.v@yandex.ru)

## 9. Физическая химия, химическая физика

### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*



**Жуйков Данил Андреевич**, 3 курс  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, институт фундаментальной биологии и биотехнологий

**Повышение эффективности метода «мокрого» сжигания органических отходов в перексиде водорода с использованием электрического тока**

Трифонов Сергей Викторович, к.б.н., e-mail: [zdaniil748@gmail.com](mailto:zdaniil748@gmail.com)

## 11. Биофизика, медицинская физика

### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*



**Вахрушева Елизавета Павловна**, 4курс  
Томск, Томский государственный университет, физический

**Неинвазивная оценка фракционного резерва кровотока на основе данных мультиспиральной компьютерной томографии**

Суюндукова Алмагуль Туктаровна, e-mail: [lizastepanova52@gmail.com](mailto:lizastepanova52@gmail.com)

### Студенты старших курсов

*Онлайн-участие. Диплом II степени*



**Смыгалина Полина Павловна**, магистрант 2 года обучения  
Томск, Томский государственный университет, радиофизический

**Распределение СВЧ-поля в камере микроволнового отогрева, работающей на частоте ниже критической, при вариации размера конечности**

Дунаевский Григорий Ефимович, д.т.н., e-mail: [psmygalina@gmail.com](mailto:psmygalina@gmail.com)

## Аспиранты и молодые ученые

*Диплом I степени*



**Суюндукова Алмагуль Туктаровна**, аспирант 3 года обучения  
Томск, Томский государственный университет, физический

**Оценка гемодинамической значимости стенозов в бифуркациях коронарных сосудов**

Демкин Владимир Петрович, д.ф.-м.н., e-mail: [almagul.suyundukova@mail.ru](mailto:almagul.suyundukova@mail.ru)



## 12. Геофизика: земная кора, океан, атмосфера

### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*



**Кондратьева Элина Романовна**, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Влияние влажности воздуха на размерный спектр аэрозолей субмикронного диапазона по результатам экспедиционных измерений**  
Панчишкина Ирина Николаевна, к.ф.-м.н., e-mail: [ekond@sfedu.ru](mailto:ekond@sfedu.ru)



*Диплом II степени*

**Веселова Елизавета Юрьевна**, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Оценка роли аэрозолей в формировании вариаций электрического поля приземной атмосферы по результатам экспедиционных измерений**  
Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н. e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)

### Студенты старших курсов

*Онлайн участие. Диплом I степени*



**Лисовицкий Артем Сергеевич**, магистрант 1 года обучения  
Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Институт Мирового океана  
**Фрактальный анализ данных о микродеформациях земной коры в период подготовки землетрясения**  
Московченко Лариса Григорьевна, к.ф.-м.н., e-mail: [lisovitskii.as@students.dvfu.ru](mailto:lisovitskii.as@students.dvfu.ru)

## 13. Акустика

### Студенты старших курсов

*Диплом I степени*



**Фатгалова Динара Робертовна**, магистрант 1 года обучения  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, институт математики, информационных технологий и физики  
**Исследование влияния теплофизической характеристики кавитационного пузырька на пороговые значения ультразвука в процессе 3D печати**  
Ломаев Степан Леонидович, к.ф.-м.н., e-mail: [w\\_c\\_b\\_and\\_a@bk.ru](mailto:w_c_b_and_a@bk.ru)

## 15. Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы.

### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*



**Фахретдинова Алсу Леонидовна**, 4 курс  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт  
**Моделирование движения деформируемых частиц в областях с детерминированным боковым смещением**  
Солнышкина Ольга Александровна, к.ф.-м.н., e-mail: [A.L.Fakhretdinova@yandex.ru](mailto:A.L.Fakhretdinova@yandex.ru)

## Студенты старших курсов

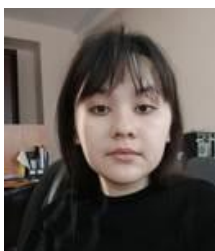
*Диплом I степени*

**Гарифуллин Искандар Шамилевич**, магистрант 1 года обучения  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт  
**Разработка микрофлюидной платформы для изучения мобилизации остаточной нефти**  
Батыршин Эдуард Сафаргалиевич, к.ф.-м.н., e-mail: [is@bgutmo.ru](mailto:is@bgutmo.ru)



*Диплом II степени*

**Фазлетдинов Спартак Уралович**, магистрант 1 года обучения  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт  
**Численное моделирование защемления нефти в поросетевых микромоделях**  
Питюк Юлия Айратовна, к.ф.-м.н., e-mail: [spartak.fazlet@gmail.com](mailto:spartak.fazlet@gmail.com)



*Онлайн-участие. Диплом I степени*

**Мухутдинова Айгуль Айратовна**, инженер-исследователь  
Уфа, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН  
**Численное исследование течения вязких жидкостей в каналах кольцевого типа**  
Урманчиев Саид Федорович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [muhutdinova18@gmail.com](mailto:muhutdinova18@gmail.com)

## Аспиранты и молодые ученые

*Онлайн-участие. Диплом I степени*

**Каримова Гульназ Римовна**, аспирант 3 года обучения  
Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального  
исследовательского центра РАН  
**Отражение и преломление косой волны на границе раздела «вода-песок, насыщенный водой или газогидратом»**  
Галиакбарова Эмилия Вильевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [gulnazkar69@gmail.com](mailto:gulnazkar69@gmail.com)



*Онлайн-участие. Диплом II степени*

**Мамаева Зилия Зайтовна**, аспирант 4 года обучения  
Уфа, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального  
исследовательского центра РАН  
**Диагностика коллекторских характеристик призабойной зоны скважины по динамике собственных колебаний столба жидкости в НКТ**  
Башмаков Рустэм Абдрауфович, к.ф.-м.н., e-mail: [zilia16@mail.ru](mailto:zilia16@mail.ru)

## 16. Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты

### Студенты младших курсов

*Диплом I степени*

**Спечев Юрий Владимирович**, 1 курс  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, фундаментальной и прикладной химии  
**Исследование механизмов образования соединений Dy и Bi при синтезе многослойных наноструктур DyCo/Bi/NiFe**  
Косырев Николай Николаевич, к.ф.-м.н., e-mail: [yuryspechev@yandex.ru](mailto:yuryspechev@yandex.ru)



## Студенты старших курсов



*Онлайн участие. Диплом I степени*

**Евграфов Артур Михайлович**, магистрант 1 года обучения  
Томск, Томский политехнический университет, инженерная школа новых  
производственных технологий  
**Получение оксида алюминия с наночастицами серебра на установке  
нанораспылительной сушки**  
Илела Алфа Эдисон, к.т.н., e-mail: [ame16@tpu.ru](mailto:ame16@tpu.ru)



*Диплом II степени*

**Подкин Егор Сергеевич**, магистрант 2 года обучения  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, ИМЕТ УрО РАН, Физико-  
технологический институт  
**Использование методов компьютерного зрения в металлографии  
алюминиевых сплавов**  
Котенков Павел Валерьевич, к.х.н., e-mail: [cherdancev\\_egor@mail.ru](mailto:cherdancev_egor@mail.ru)

## Аспиранты и молодые ученые



*Диплом I степени*

**Теплинская Анастасия Сергеевна**, аспирант 1 года обучения  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, институт инженерной физики и  
радиоэлектроники  
**Тепловые свойства пористых кремниевых наноматериалов**  
Федоров Александр Семенович, д.ф.-м.н., e-mail: [anastasiateplinskaia@gmail.com](mailto:anastasiateplinskaia@gmail.com)

## 17. Радиофизика. Электроника

### Студенты старших курсов



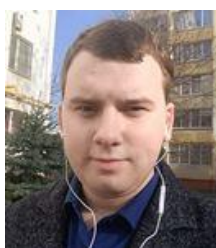
*Диплом I степени*

**Коноплев Артем Александрович**, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Моделирование диаграммообразующих устройств на основе метаповерхностей  
в ГГц диапазоне**  
Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н., e-mail: [akonoplev@sfedu.ru](mailto:akonoplev@sfedu.ru)



*Онлайн-участие. Диплом II степени*

**Гризодуб Алексей Николаевич**, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Полосно-пропускающий SIW-фильтр**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н., e-mail: [agrizodub@sfedu.ru](mailto:agrizodub@sfedu.ru)



*Онлайн-участие. Диплом III степени*

**Павленко Михаил Андреевич**, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Полосно-пропускающий фильтр на тонких резонансных диафрагмах**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н., e-mail: [mpavlenko@sfedu.ru](mailto:mpavlenko@sfedu.ru)

## 19. Теплофизика и теплотехника

### Студенты старших курсов

*Диплом I степени*

**Деринг Екатерина Даниловна**, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический  
**Особенности исследования процесса рассеяния частиц сверхзвукового кластированного потока методом молекулярно-пучковой масс-спектрометрии**  
Кирилл Алексеевич Дубровин, e-mail: [e.dering@g.nsu.ru](mailto:e.dering@g.nsu.ru)

### Аспиранты и молодые ученые

*Диплом II степени*

**Ковальчук Татьяна Николаевна**, аспирант 1 года обучения  
Тюмень, Тюменский государственный университет, физико-технический институт  
**Определение основных технологических параметров при пароциклической обработке скважин**  
Шевелёв Александр Павлович, к.ф.-м.н., e-mail: [t.n.kovalchuk@mail.ru](mailto:t.n.kovalchuk@mail.ru)

## 21. Проблемы и методология преподавания физики

### Аспиранты и молодые ученые

*Диплом I степени*



**Нерода Александр Андреевич**, аспирант 2 года обучения  
Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий  
**Формирование инженерного мышления: методологические аспекты**  
Ларионов Виталий Васильевич, д.п.н., e-mail: [Neroda\\_94@mail.ru](mailto:Neroda_94@mail.ru)

**Адрес центрального оргкомитета конференций ВНКСФ:**

620063, Екатеринбург, а.я 759, Телефон: (863) 522-48-18, 8-923-422-74-34

E-mail: [asf@asf.ur.ru](mailto:asf@asf.ur.ru) <http://www.asf.ural.ru>

**Председатель оргкомитета конференций ВНКСФ: Александр Арапов (АСФ России)**

**e-mail: [agarov@asf.ur.ru](mailto:agarov@asf.ur.ru)**, телефон: (863) 522-48-18, 8-923-422-74-34

**Сектора деятельности оргкомитета:**

- общая организация и диспетчерская служба, регистрация, в.т.ч.: - хозяйственные вопросы, размещение, питание, транспорт;
- информационно - техническая группа (компьютеры сеть, мульти-медиа, аудио -оборудование, фото, видео-съемка, редактирование материалов), работа с СМИ
- научная программа (в комплексе)
- культурная, спортивная программы, мини-путешествия, экскурсии (в комплексе)

**Состав оргкомитета по городам**

**Новосибирск:**

- **Исламов Дамир Ревинирович**, к.ф.-м.н., с.н.с. Института физики полупроводников СО РАН, e-mail: [damir@isp.nsc.ru](mailto:damir@isp.nsc.ru), тел: +7(903)904-60-49 (со-председатель ОК)
- **Юношев Александр Сергеевич**, к.ф.-м.н., зам. дир. по науке Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, e-mail: [yunoshev@hydro.nsc.ru](mailto:yunoshev@hydro.nsc.ru)
- **Шмакова Наталья Дмитриевна**, к.ф.-м.н., с.н.с., председатель СНМ, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, e-mail: [shmakova@hydro.nsc.ru](mailto:shmakova@hydro.nsc.ru)
- **Залялов Тимур Маратович**, аспирант, инженер-исследователь ИФП СО РАН, e-mail: [timz@isp.nsc.ru](mailto:timz@isp.nsc.ru)
- **Аникин Юрий Александрович**, к.т.н. зам. главного ученого секретаря СО РАН, e-mail: [anikin@sb-ras.ru](mailto:anikin@sb-ras.ru)

**Екатеринбург:**

**Институт электрофизики УрО РАН:**

Адрес: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена – 106, каб. 310. Телефон: (343) 267-8821

- **Кайгородова Ольга Анатольевна**, вед. инженер по патентной и изобретательной работе ИЭФ УрО РАН, тел: +7(922)223-96-83, e-mail: [o.kaygorodova@gmail.com](mailto:o.kaygorodova@gmail.com)
- **Чепусов Александр Сергеевич**, м.н.с. Институт электрофизики УрО РАН, [chepusov@iep.uran.ru](mailto:chepusov@iep.uran.ru)

**Уральский федеральный университет**

- **Меренцов Александр Ильич**, с.н.с. лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН, доцент кафедры физики и астрономии СУНЦ УрФУ, Екатеринбург, e-mail: [alexander.merentsov@urfu.ru](mailto:alexander.merentsov@urfu.ru)

**Ростов-на-Дону:**

- **Бураева Елена Анатольевна**, зав. лабораторией радиозокологических исследований НИИ физики ЮФУ, тел. 89185973011, e-mail: [buraeva\\_elena@mail.ru](mailto:buraeva_elena@mail.ru),

**Красноярск**

- **Косырев Николай Николаевич**, к.ф.-м.н., н.с. лаб. магнитодинамики Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск e-mail: [kosyrev@inbox.ru](mailto:kosyrev@inbox.ru)

**Оргкомитет ВНКСФ-28 выражает благодарность за содействие в организации и проведении в программе визитов:**

**Сибирский Центр ФГБУ "Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"**

- директору Центра Калашникову Александру Викторовичу

**Институт гидродинамики СО РАН:**

- директору Института гидродинамики СО РАН Ерманюку Евгению Валерьевичу за личное участие и лекцию об Институте в кабинете академика Михаила Алексеевича Лаврентьева

- зам. директора по науке Юношеву Александру Сергеевичу

- председателю СММ Шмаковой Наталье Дмитриевне

**- Клуб юных техников Новосибирского Академгородка (КЮТ):**

- директору Дембровскому Анатолию Леонидовичу

- преподавателю Демьяновой Людмиле

**Институт катализа СО РАН:**

- учёному секретарю Института Дубинину Юрию Владимировичу

- научному сотруднику Печенкину Алексею

**Институт теплофизики СО РАН:**

- пресс-секретарю Шишкиной Елене Александровне

- председателю Совета молодых ученых Пещенюк Юлии Александровне

- членам Совета молодых ученых Алексею Александровичу Лукьянову и Андрею Александровичу Лукьянову

**Институт химии кинетики и горения:**

- зам. директора по науке Валиулину Сергеею Владимировичу

- учёному секретарю Института Пыряевой Александре Павловне

**Институт физики полупроводников:**

- зав. лаб. №18 аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии GaN гетероструктур на подложках кремния для силовых и СВЧ транзисторов Милахину Денису Сергеевичу

- с.н.с. Исламову Дамиру Ревинировичу

**Новосибирск, Новосибирский государственный университет**

- Асеев Александр Леонидович, д.ф.-м.н., академик РАН, г.н.с. НГУ
- Марчук Игорь Владимирович, д.ф.-м.н., профессор РАН, г.н.с. ИТ СО РАН, декан механико-математического факультета НГУ

**Сибирское отделение Российской академии наук (СО РАН)**

- Аникин Юрий Александрович, к.т.н., зам. главного ученого секретаря СО РАН

**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН**

- Диканский Николай Сергеевич, д.ф.-м.н., академик РАН, советник РАН
- Резниченко Алексей Викторович, к.ф.-м.н., учёный секретарь ИЯФ СО РАН

**Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН**

- Ерманюк Евгений Валерьевич, д.ф.-м.н., директор ИГиЛ СО РАН

**Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН**

- Каламейцев Александр Владимирович, к.ф.-м.н., зам. директора по научно-организационной работе ИФП СО РАН
- Исламов Дамир Ревинирович, к.ф.-м.н., с.н.с. ИФП СО РАН

**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН**

- Чернов Андрей Александрович, д.ф.-м.н., профессор РАН, в.н.с. ИТ СО РАН
- Двойнишников Сергей Владимирович, д.т.н., в.н.с. ИТ СО РАН

**Институт катализа СО РАН**

- Дубинин Юрий Владимирович, к.х.н., учёный секретарь ИК СО РАН

**Институт лазерной физики СО РАН**

- Ражев Александр Михайлович, д.ф.-м.н., г.н.с., профессор ИЛФ СО РАН

**Екатеринбург, Институт электрофизики УрО РАН**

- Чайковский Станислав Анатольевич, д.ф.-м.н. член. кор. РАН, директор ИЭФ УрО РАН
- Болтачев Грей Щамилович, д.ф.-м.н., зам. директора по научной работе ИЭФ УрО РАН

**Ростов-на-Дону, Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета**

- Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н., директор НИИ физики ЮФУ
- Бураева Елена Анатольевна, д.б.н., зам. директора НИИ физики по научно-образовательной деятельности

## 1. Теоретическая физика, математическая физика

- **Ковалев Вадим Михайлович**, д.ф.-м.н., зав. лаборатории теоретической физики, Институт физики полупроводников СО РАН, лаб. теор. физики, г. **Новосибирск**, e-mail: [vadimkovalev@isp.nsc.ru](mailto:vadimkovalev@isp.nsc.ru)
- **Гусаревич Евгений Степанович\***, к.ф.-м.н., с.н.с., доцент кафедры теоретической физики Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, г. **Архангельск**, e-mail: [gusarevich@gmail.com](mailto:gusarevich@gmail.com), (АСФ России) (онлайн)

## 2. Физика конденсированного состояния вещества

- **Катков Всеволод Леонидович**, к.ф.-м.н. нач. сектора №3 физики наноструктур Научного отдела теории конденсированных сред (НОТКС), Лаборатории теоретической физики (ЛТФ) Объединенного института ядерных исследований, **Дубна**, e-mail: [katkov@theor.jinr.ru](mailto:katkov@theor.jinr.ru)
- **Меренцов Александр Ильич**, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатрии электрических явлений ИФМ УрО РАН, доцент кафедры физики и астрономии СУНЦ УрФУ, **Екатеринбург**, e-mail: [alexander.merentsov@urfu.ru](mailto:alexander.merentsov@urfu.ru) (АСФ России)

## 3. Физика полупроводников и диэлектриков

- **Перевалов Тимофей Викторович**, к.ф.-м.н., с.н.с., Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. **Новосибирск** e-mail: [timson@isp.nsc.ru](mailto:timson@isp.nsc.ru)
- **Гисматулин Андрей Андреевич**, к.ф.-м.н., м.н.с., Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. **Новосибирск**. e-mail: [aagismatulin@isp.nsc.ru](mailto:aagismatulin@isp.nsc.ru)
- **Осинных Игорь Васильевич**, м.н.с., Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. **Новосибирск** e-mail: [igor-osinnykh@isp.nsc.ru](mailto:igor-osinnykh@isp.nsc.ru)
- **Исламов Дамир Ревинирович**, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. **Новосибирск** (АСФ России), e-mail: [damir@isp.nsc.ru](mailto:damir@isp.nsc.ru) (АСФ России)

## 4. Физика атомного ядра и элементарных частиц . Физика высоких энергий

- **Бабкин Вадим Андреевич**, к.ф.-м.н., нач. сектора идентификации частиц Научно-экспериментального отдела многоцелевого детектора (НЭОМД), лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ) г. **Дубна** e-mail: [babkin@jinr.ru](mailto:babkin@jinr.ru)
- **Осипов Алексей Сергеевич\***, директор Научно- производственное отделения развития технологий радиотерапии АО НИИТФА г. **Москва** e-mail: [okdf2007@mail.ru](mailto:okdf2007@mail.ru) (АСФ России)

## 5. Физика плазмы, электрофизика, плазменные технологии

- **Пинженин Егор Игоревич**, н.с. лаб. 9-1, Институт ядерной физики СО РАН, лаб. 9-1 г. **Новосибирск**. e-mail: [E.I.Pinzhenin@inp.nsk.su](mailto:E.I.Pinzhenin@inp.nsk.su)
- **Чепусов Александр Сергеевич**, к.т.н., н.с. Институт электрофизики УрО РАН, **Екатеринбург**, e-mail: [chepusov@iep.uran.ru](mailto:chepusov@iep.uran.ru) (АСФ России)

## 6. Магнетизм

- **Ковалев Вадим Михайлович**, д.ф.-м.н., зав. лаборатории теоретической физики, Институт физики полупроводников СО РАН, лаб. теор. физики, г. **Новосибирск**, e-mail: [vadimkovalev@isp.nsc.ru](mailto:vadimkovalev@isp.nsc.ru)
- **Косырев Николай Николаевич**, к.ф.-м.н., н.с., лаб. магнитодинамики Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. **Красноярск**, e-mail: [kosyrev@inbox.ru](mailto:kosyrev@inbox.ru)

## 7. Оптика и спектроскопия

- **Володин Владимир Алексеевич**, д.ф.-м.н., в.н.с., Институт физики полупроводников СО РАН, лаборатория неравновесных полупроводниковых систем, г. **Новосибирск** e-mail: [volodin@isp.nsc.ru](mailto:volodin@isp.nsc.ru)
- **Чуркин Дмитрий Сергеевич**, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт лазерной физики СО РАН. г. **Новосибирск**, email: [d.churkin@g.nsu.ru](mailto:d.churkin@g.nsu.ru)
- **Петрова Ольга Викторовна**, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. **Сыктывкар** [teiou@mail.ru](mailto:teiou@mail.ru)

## 8. Квантовая электроника и лазерная физика

- **Телегин Андрей Владимирович**<sup>\*</sup>, к.ф.-м.н., в.н.с., зав. лаб. магнитных полупроводников Институт физики металлов УрО РАН, г. **Екатеринбург**, e-mail: [telegin@imp.uran.ru](mailto:telegin@imp.uran.ru)

## 9. Физическая химия, химическая физика

- **Поздняков Иван Павлович**, к.х.н., с.н.с. Института химии и кинетики горения СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: [ipozdnyak@kinetics.nsc.ru](mailto:ipozdnyak@kinetics.nsc.ru)
- **Лебедев Михаил Сергеевич**, к.х.н., н.с., Институт неорганической химии им А. В. Николаева СО РАН. г. **Новосибирск**, e-mail: [lebedev@niic.nsc.ru](mailto:lebedev@niic.nsc.ru)
- **Юношев Александр Сергеевич**, к.ф.-м.н., зам. дир. по науке Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск e-mail: [yunoshev@hydro.nsc.ru](mailto:yunoshev@hydro.nsc.ru)
- **Бураева Елена Анатольевна**, д.б.н., доцент, зав. лаб., зам. директора НИИ физики Южного федерального университета, г. **Ростов-на-Дону**, e-mail: [buraeva\\_elena@mail.ru](mailto:buraeva_elena@mail.ru) (*АСФ России*)

## 10. Астрофизика, физика космоса – (секция – семинар)

- **Попова Мария Эриковна**<sup>\*</sup>, к.ф.-м.н., с.н.с. Астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет, e-mail: [maria.popova@urfu.ru](mailto:maria.popova@urfu.ru)

## 11. Биофизика, медицинская физика

- **Шарифуллина Татьяна Сергеевна**, к.ф.-м.н., н.с. лаб биомеханики, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, лаб биомеханики. **Новосибирск** e-mail: [tatiana\\_06.08@mail.ru](mailto:tatiana_06.08@mail.ru)
- **Куянова Юлия Олеговна**, м.н.с. лаб биомеханики, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, лаб биомеханики. **Новосибирск** e-mail: [july9696@mail.ru](mailto:july9696@mail.ru)

- **Гришин Виктор Григорьевич**, к.б.н., с.н.с. Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. **Новосибирск**, e-mail: [GrishinVG@ict.nsc.ru](mailto:GrishinVG@ict.nsc.ru)
- **Закирьянов Фарит Кабирович**\*, к.ф.-м.н., доцент каф. теор. физики ФТИ, Уфимский университет науки и технологий, г. **Уфа** e-mail: [farni@rambler.ru](mailto:farni@rambler.ru) (АСФ России) (онлайн)

## 12. Геофизика: земная кора, океан, атмосфера

- **Ерманюк Евгений Валерьевич**, д.ф.-м.н., директор, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. **Новосибирск** e-mail: [ermanyuk@hydro.nsc.ru](mailto:ermanyuk@hydro.nsc.ru)
- **Шмакова Наталья Дмитриевна**, к.ф.-м.н., с.н.с., председатель СНМ, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. **Новосибирск** e-mail: [shmakova@hydro.nsc.ru](mailto:shmakova@hydro.nsc.ru)
- **Тарантин Михаил Викторович**\*, к.т.н., научный сотрудник, Горный институт УрО РАН, г. **Пермь**, e-mail: [gptmv@mi-perm.ru](mailto:gptmv@mi-perm.ru) (АСФ России) (онлайн)

## 13. Акустика

- **Галимзянов Марат Назипович**\*, и. о. директора ИМех УФИЦ РАН, к.ф.-м.н., доцент e-mail: [monk@anrb.ru](mailto:monk@anrb.ru)
- **Ильин Владимир Алексеевич**, к.ф.-м.н., доцент, кафедры физики фазовых переходов, физический факультет ПермГУ, **Пермь** e-mail: [ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru) (АСФ России) (онлайн)

## 14. Статистическая механика жидкости, газа и плазмы. Молекулярная физика

- **Ильин Владимир Алексеевич**, к.ф.-м.н., доцент, кафедры физики фазовых переходов, физический факультет ПермГУ, **Пермь** e-mail: [ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru) (АСФ России) (онлайн)

## 15. Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика

- **Солнышкина Ольга Александровна**, к.ф.-м.н., доцент, с.н.с., Уфимский университет науки и технологий, г. **Уфа**, e-mail: [olgasolnyshkina@gmail.com](mailto:olgasolnyshkina@gmail.com)
- **Яцких Алексей Анатольевич**, к.ф.-м.н., н.с. лаб. 14. Институт теоретической и прикладной механики имени С. А. Христиановича СО РАН, ст. преподаватель КОФ НГУ email: [yatskikh@itam.nsc.ru](mailto:yatskikh@itam.nsc.ru)
- **Галимзянов Марат Назипович**\*, и. о. директора ИМех УФИЦ РАН, к.ф.-м.н., доцент e-mail: [monk@anrb.ru](mailto:monk@anrb.ru)
- **Ильин Владимир Алексеевич**, к.ф.-м.н., доцент, кафедры физики фазовых переходов, физический факультет ПермГУ, **Пермь** e-mail: [ilin1@psu.ru](mailto:ilin1@psu.ru) (АСФ России) (онлайн)

## 16. Материаловедение . Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты

- **Смовж Дмитрий Владимирович**, д.ф.-м.н., зав. лаб., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, г. **Новосибирск**, e-mail: [smovzh@itp.nsc.ru](mailto:smovzh@itp.nsc.ru)
- **Полянский Дмитрий Александрович**\*, к.ф.-м.н., доцент департамента Общей и экспериментальной физики ИНТиПМ, Дальневосточный федеральный университет, Школа естественных наук, г. **Владивосток**, e-mail: [rambo192@mail.ru](mailto:rambo192@mail.ru) (онлайн)



## 17. Радиофизика

- **Пурыга Екатерина Александровна**, к.т.н., с.н.с., лаб.9-1, Институт ядерной физики СО РАН, лаб. 9-1, г. **Новосибирск**, e-mail: [E.A.Puryga@inp.nsk.su](mailto:E.A.Puryga@inp.nsk.su)
- **Голицын Александр Андреевич**, к.т.н., н.с., Институт физики полупроводников СО РАН, г. **Новосибирск** e-mail: [aag-09@yandex.ru](mailto:aag-09@yandex.ru) (АСФ России)

## 18. Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях.

- **Двойнишников Сергей Владимирович**, д.т.н., зав. лаб. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. **Новосибирск**, e-mail: [dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)
- **Шауро Виталий Павлович**\*, к.ф.-м.н., Институт физики СО РАН, **Красноярск** e-mail: [Shaurkin@hotmail.com](mailto:Shaurkin@hotmail.com) , (АСФ России) (онлайн)

## 19. Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена.

- **Смовж Дмитрий Владимирович**, д.ф.-м.н., зав. лаб., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, г. **Новосибирск**, e-mail: [smovzh@itp.nsc.ru](mailto:smovzh@itp.nsc.ru)
- **Чернов Андрей Александрович**, д.ф.-м.н., профессор РАН, в.н.с. Института теплофизики СО РАН, доцент кафедры физики физфака и СУНЦ НГУ , г.н.с. лаб. физико-технических основ энергетики НГУ, г. **Новосибирск** e-mail: [chernov@itp.nsc.ru](mailto:chernov@itp.nsc.ru)
- **Анкудинов Владимир Евгеньевич**\*, к.ф.-м.н., н.с. теоретический отдел, Институт физики высоких давлений им. Верещагина РАН, г. **Москва**, e-mail: [vladimir@ankudinov.org](mailto:vladimir@ankudinov.org) (АСФ России) (онлайн)

## 20. Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике.

- **Буряева Елена Анатольевна**, д.б.н., доцент, зав. лаб. радиоэкологических исследований, зам. директора НИИ физики Южного федерального университета, г. **Ростов-на-Дону**, e-mail: [buraeva\\_elena@mail.ru](mailto:buraeva_elena@mail.ru) (АСФ России) (онлайн)

## 21. Проблемы и методологии преподавания физики. История физики и техники.

- **Аржаник Алексей Ремович**, к.п.н., зав. каф. физики и методики обучения по физике Томского государственного педагогического университета, г. **Томск**, e-mail: [iii\\_75@inbox.ru](mailto:iii_75@inbox.ru)
- **Воробьев Максим Олегович**, инженер, преподаватель. НИИ нанотехнологии и наноматериалы" Тамбовского государственного университета, г. **Тамбов**, школа № 3 г. Котовска, e-mail: [vorob--yov@mail.ru](mailto:vorob--yov@mail.ru) (АСФ России)
- **Меренцов Александр Ильич**, к.ф.-м.н.,с.н.с. лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН, доцент кафедры физики и астрономии СУНЦ УрФУ, Екатеринбург, e-mail: [alexander.merentsov@urfu.ru](mailto:alexander.merentsov@urfu.ru) (АСФ России)

**Примечания:** - *курсивом отмечены* (или АСФ России) члены научного комитета, которые участвуют в нем по приглашению АСФ России (или являются членами АСФ) и представляют мнение Ассоциации в научном комитете конференции, являются научными секретарями секций

\* - отмечены участники НК, принимающие участие в конференции в режиме «онлайн»

## График работы секций и программы визитов ВНКСФ-28

<b>1 апреля 2024, понедельник</b> <b>г. Бердск ДСОЛ «Юбилейный», Новосибирский Академгородок</b>	
<b>09.30 – 13.00</b>  <b>14.00 – 14.30</b> <b>14.30 – 19.30</b>	<b>Программа визитов:</b> - Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН - Сибирский центр Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» <b>Официальное открытие ВНКСФ-28 (Юбилейный – большой зал)</b> <b>Пленарная программа ВНКСФ-28</b> , совместно с конкурсной программой секций (смотрите подробнее в «Пленарной программе»): <b>04 - Физика атомного ядра и элементарных частиц, высоких энергий (2/2/0)</b> <b>05 - Электрофизика. Физика плазмы, плазменные технологии (1/7/0)</b>
<b>2 апреля, вторник</b> <b>г. Бердск ДСОЛ «Юбилейный», Новосибирский Академгородок</b>	
<b>09.00 – 17.00</b>	<b>Экскурсионная программа «Золотая долина» по историческим местам и достопримечательностям Академгородка с визитами (1 группа):</b> - Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН - Клуб юных техников - Центральный Сибирский геологический музей Института геологии и минералогии СО РАН им В.С. Соболева <i>(уточняется)</i>
<b>09.30 – 13.30</b> <b>большой зал</b>	Объединенная конкурсная и пленарная программа секций: <b>02 - Физика конденсированного состояния вещества (1/5/2)</b> <b>03 - Физика полупроводников и диэлектриков (3/9/1)</b> <b>06 - Магнетизм (0/4/0)</b>
<b>09.30 – 14.00</b> <b>малый зал</b>	Объединенная конкурсная и пленарная программа секций: <b>01 - Теоретическая физика (5)</b> <b>14 - Статистическая механика жидкости, газа и плазмы (1)</b> <b>15 - Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы (1/4/1)</b>
<b>14.30 – 19.30</b> <b>большой зал</b>	Конкурсная и пленарная программа секций: <b>11 - Биофизика, медицинская физика (1/8/1)</b> <b>12 - Геофизика: земная кора, океан, атмосфера (1/5/0)</b>
<b>14.30 – 19.30</b> <b>малый зал</b>	Объединенная конкурсная и пленарная программа секций <i>(окончание)</i> <b>02 - Физика конденсированного состояния вещества (1/6/2)</b> <b>03 - Физика полупроводников и диэлектриков (3/9/1)</b> <b>06 - Магнетизм (0/4/0)</b>
<b>3 апреля, среда</b> <b>Новосибирский Академгородок</b>	
<b>09.00 – 19.00</b> <b>две группы на</b> <b>двух автобусах</b>	<b>Большая программа визитов по Новосибирскому научному центру:</b> - Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН - Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) <i>(уточняется)</i> - Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН - Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

<b>4 апреля, четверг</b> <b>г. Бердск ДСОЛ «Юбилейный», Новосибирский Академгородок</b>	
<b>09.00 – 17.00</b>	<b>Экскурсионная программа «Золотая долина» по историческим местам и достопримечательностям Академгородка с визитами (2 группа):</b> - Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН - Клуб юных техников - Центральный Сибирский геологический музей Института геологии и минералогии СО РАН им В.С. Соболева ( <i>уточняется</i> )
<b>09.30 – 13.30</b> большой зал	Конкурсная и пленарная программа секций (начало): <b>07 - Оптика и спектроскопия (3/14/2)</b> <b>08 - Квантовая электроника и лазерная физика (0/2/0)</b>
<b>09.30 – 13.30</b> малый зал	<i>Резервное время</i>
<b>14.30 – 19.30</b> большой зал	Объединенная программа конкурсных и пленарных докладов секций: <b>10 - Астрофизика, физика космоса. Космические технологии (1/1/1)</b> <b>17 - Радиофизика. Электроника (4)</b> <b>18 – Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях (2/7/0)</b>
<b>14.30 – 19.30</b> малый зал	Конкурсная и пленарная программа секций (окончание): <b>07 - Оптика и спектроскопия (3/14/2)</b> <b>08 - Квантовая электроника и лазерная физика (0/2/0)</b>
<b>5 апреля, пятница</b> <b>г. Бердск ДСОЛ «Юбилейный», Новосибирский Академгородок</b>	
<b>09.00 – 13.00</b>	<b>Программа визитов:</b> - Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ФИЦ)
<b>14.00 – 18.00</b>	<b>Программа визитов:</b> - Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
<b>09.30 – 13.30</b> большой зал	Объединенная программа конкурсных и пленарных докладов секций: <b>16 - Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы, композиты (17)</b> <b>19 - Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена (2/7/1)</b> <i>начало</i>
<b>14.30 – 19.30</b> большой зал	Конкурсная и пленарная программа секции: <b>09 - Физическая химия, химическая физика (2/14/0)</b>
<b>14.30 – 19.00</b> малый зал	Объединенная программа конкурсных и пленарных докладов секций: <b>16 - Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы, композиты</b> <b>19 - Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена (2/7/1)</b> <i>окончание</i>

<b>6 апреля, суббота</b> <b>г. Бердск ДСОЛ «Юбилейный», Новосибирский Академгородок</b>	
<b>10.00 – 13.00</b> большой зал	<b>Пленарная программа</b> (уточняется) <i>Резервное время</i>
<b>10.00 – 13.30</b> Клуб юных техников Академгородка	Конкурсная, пленарная и творческая программа секции, круглый стол: <b>21 –проблемы и методология преподавания физики, история физики.</b> <b>Школьные проекты</b> (8 школьных, 1 пленарный доклад, 5 конкурсных докладов)
<b>15.00 – 17.00</b> <b>17.00 – 18.00</b> Большая аудитория физфака НГУ	- <b>Пленарная программа ВНКСФ-28</b> (см. «Пленарная программа») - <b>Официальное закрытие, вручение дипломов</b> - <b>Фотографирование</b>
<b>20.00 – 00.00</b>	<b>Прощальный вечер ВНКСФ-28</b> (большой зал – Юбилейный)

**Примечания:**

- в наименовании секции сначала указан ее порядковый номер в базе данных ВНКСФ, затем в скобках указаны: количество обзорных (пленарных) докладов / количество очных конкурсных докладов / количество стендовых докладов
- в данное время работы секций входят не только конкурсные доклады участников, но и обзорные доклады членов научного комитета конференции
- стендовые сессии проводятся в обеденный перерыв, а также в конце работы секций.
- **«гибридный график»** - означает, что в определенный момент объединенная программа секций разбивается на параллельные потоки по секциям, для заслушивания конкурсных докладов с возможным переходом секции в другую аудиторию.

**Программа пленарных и обзорных докладов конференции ВНКСФ-28 «Школа ВНКСФ-28»**

<p style="text-align: center;"><b>Пленарная программа открытия</b> <b>1 апреля 2024, 14.30. «Юбилейный», большой зал</b></p>
<p><b>Рубцов Иван Андреевич</b>, к.ф.-м.н., н.с., лаб. физики взрыва, Институт гидродинамики им. М.Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск e-mail: <a href="mailto:rubtsov@hydro.nsc.ru">rubtsov@hydro.nsc.ru</a> <i>Институт гидродинамики: от истоков к современности</i></p>
<p style="text-align: center;"><b>2. Физика конденсированного состояния вещества</b> <b>5 апреля, 9.30. "Юбилейный", большой зал</b></p>
<p><b>Катков Всеволод Леонидович</b>, к.ф.-м.н. нач. сектора №3 физики наноструктур Научного отдела теории конденсированных сред (НОТКС), Лаборатории теоретической физики (ЛТФ) Объединенного института ядерных исследований, Дубна, e-mail: <a href="mailto:katkov@theor.jinr.ru">katkov@theor.jinr.ru</a> <i>Температурная зависимость запрещенной зоны полностью фторированных/гидрированных углеродных нанотрубок: роль одномерных цепочек</i></p>
<p style="text-align: center;"><b>3. Физика полупроводников и диэлектриков (включая наносистемы)</b> <b>5 апреля, 9.30. "Юбилейный", большой зал.</b></p>
<p><b>Исламов Дамир Ревинирович</b>, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, e-mail: <a href="mailto:damir@isp.nsc.ru">damir@isp.nsc.ru</a> <i>Универсальная память: ожидания, реальность и перспективы</i></p> <p><b>Гисматулин Андрей Андреевич</b>, к.ф.-м.н., м.н.с., Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск. e-mail: <a href="mailto:aagismatulin@isp.nsc.ru">aagismatulin@isp.nsc.ru</a> <i>Мемристорная память на основе оксидов и нитридов кремния</i></p> <p><b>Осинных Игорь Васильевич</b>, м.н.с., Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск e-mail: <a href="mailto:igor-osinnykh@isp.nsc.ru">igor-osinnykh@isp.nsc.ru</a> <i>Применение III-нитридов для создания светоизлучающих приборов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и СВЧ-транзисторов</i></p>
<p style="text-align: center;"><b>4. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Физика высоких энергий</b> <b>1 апреля, 14.30. "Юбилейный", большой зал.</b></p>
<p><b>Бабкин Вадим Андреевич</b>, к.ф.-м.н., нач. сектора идентификации частиц Научно-экспериментального отдела многоцелевого детектора (НЭОМД), лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) г. Дубна e-mail: <a href="mailto:babkin@jinr.ru">babkin@jinr.ru</a> <i>Наука и технологии на ускорительном комплексе NICA</i></p> <p><b>Бухтияров Андрей Валерьевич</b>, к.х.н., зав. отделом синхротронных исследований, Центр коллективного пользования Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) ИК СО РАН, Новосибирск, e-mail: <a href="mailto:avb@catalysis.ru">avb@catalysis.ru</a> <i>ЦКП «СКИФ»: Текущий статус проекта</i></p>
<p style="text-align: center;"><b>5. Электрофизика, электрофизические установки. Физика плазмы, плазменные технологии.</b> <b>6 апреля, 15.00. Физический факультет НГУ, большая аудитория</b></p>
<p><b>Шайхисламов Ильдар Фаритович</b>, д.ф.-м.н., директор, Институт лазерной физики СО РАН e-mail: <a href="mailto:shaihislamovildar@yandex.ru">shaihislamovildar@yandex.ru</a> <i>Лабораторное моделирование процессов в геофизической и космической плазме</i></p>

**7. Оптика и спектроскопия**  
**4 апреля, 9.30. "Юбилейный", большой зал**

**Володин Владимир Алексеевич**, д.ф.-м.н., в.н.с., Институт физики полупроводников СО РАН, лаборатория неравновесных полупроводниковых систем, г. Новосибирск e-mail: [volodin@isp.nsc.ru](mailto:volodin@isp.nsc.ru)

*Комбинационное рассеяние света – сохранение квазимпульса и модель локализации фононов в нанокристаллах*

**Петрова Ольга Викторовна**, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар [teiou@mail.ru](mailto:teiou@mail.ru)  
*Синхротронное излучение: ультрамягкая спектроскопия поглощения биологических объектов и композитов на их основе*

**Макаров Павел Андреевич**, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории экспериментальной физики Физико-математический институт ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар e-mail: [makarovpa@ipm.komisc.ru](mailto:makarova@ipm.komisc.ru)

*Программные пакеты для расчёта и анализа XAFS-спектров*

**8. Магнетизм**  
**2 апреля, 14.30. «Юбилейный», малый зал**

**Косырев Николай Николаевич**, к.ф.-м.н., н.с., лаб. магнитодинамики Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, e-mail: [kosyrev@inbox.ru](mailto:kosyrev@inbox.ru)

*Магнитооптика наноструктурированных систем*

**9. Физическая химия, химическая физика**  
**5 апреля, 14.30. "Юбилейный", большой зал**

**Лебедев Михаил Сергеевич**, к.х.н., н.с., Институт неорганической химии им А. В. Николаева СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: [lebedev@niic.nsc.ru](mailto:lebedev@niic.nsc.ru)

*Физико-химические основы и примеры практического применения технологии молекулярного наслаивания*

**Поздняков Иван Павлович**, к.х.н., с.н.с. Института химии и кинетики горения СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: [ipozdnyak@kinetics.nsc.ru](mailto:ipozdnyak@kinetics.nsc.ru)

*Основные принципы и применение оптической спектроскопии и фотохимии*

**10. Астрофизика, физика космоса, современные и перспективные космические исследования и технологии**  
**4 апреля, 14.30. "Юбилейный", большой зал**

**Шайхисламов Ильдар Фаритович**, д.ф.-м.н., директор, Институт лазерной физики СО РАН e-mail: [shaikhislamovildar@yandex.ru](mailto:shaikhislamovildar@yandex.ru)

*Экзопланеты и исследования атмосфер горячих Юпитеров*

**Назаров Сергей Валентинович**, н.с. Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Республика Крым e-mail: [astrotourist@gmail.com](mailto:astrotourist@gmail.com)

*Восстановление и модернизация телескопа «Синтез»*

**11. Биофизика, медицинская физика**  
**2 апреля, 14.30. "Юбилейный", большой зал**

**Шарифуллина Татьяна Сергеевна, Куянова Юлия Олеговна:** к.ф.-м.н., н.с; м.н.с. лаб биомеханики, Институт гидродинамики СО РАН, Новосибирск e-mail: [tatiana\\_06.08@mail.ru](mailto:tatiana_06.08@mail.ru)

*Математическое моделирование гемодинамики сосудов головного мозга при наличии патологий*

<b>12. Геофизика: земная кора, океан, атмосфера</b> <b>2 апреля, 14.30. "Юбилейный", большой зал</b>
<p><b>Ерманюк Евгений Валерьевич</b>, д.ф.-м.н., директор, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск e-mail: <a href="mailto:ermanyuk@hydro.nsc.ru">ermanyuk@hydro.nsc.ru</a>  <i>Волновые аттракторы в лабораторном эксперименте и гео- и астрофизических приложениях</i></p>
<b>15. Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы.</b> <b>Инженерная механика.</b> <b>2 апреля, 09.30. "Юбилейный", малый зал</b>
<p><b>Солнышкина Ольга Александровна</b>, к.ф.-м.н., доцент, с.н.с., Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, e-mail: <a href="mailto:olgasolnyshkina@gmail.com">olgasolnyshkina@gmail.com</a>  <i>Экспериментальные и вычислительные подходы к микрофлюидике для изучения процессов в нефтегазовой индустрии</i></p>
<b>18. Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях.</b> <b>4 апреля, 14.30. "Юбилейный", большой зал.</b>
<p><b>Двойнишников Сергей Владимирович</b> д.т.н., зав. лаб. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: <a href="mailto:dv.s@mail.ru">dv.s@mail.ru</a>  <i>Системы технического зрения для науки и промышленных технологий</i></p> <p><b>Полянский Дмитрий Александрович</b>, к.ф.-м.н., доцент департамента Общей и экспериментальной физики ИНТиПМ, Дальневосточный федеральный университет, Школа естественных наук, г. Владивосток, e-mail: <a href="mailto:rambo192@mail.ru">rambo192@mail.ru</a>  <i>Технические каналы утечки информации, возникающие при ограничении контролируемой зоны (формат доклада уточняется)</i></p>
<b>19. Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена.</b> <b>5 апреля, 09.30. "Юбилейный", большой зал</b>
<p><b>Смовж Дмитрий Владимирович</b>, д.ф.-м.н., зав. лаб., Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, e-mail: <a href="mailto:smovzh@itp.nsc.ru">smovzh@itp.nsc.ru</a>  <i>Электродуговой синтез металл-углеродных наночастиц и микромоторов</i></p> <p><b>Чернов Андрей Александрович</b>, д.ф.-м.н., профессор РАН, в.н.с. Института теплофизики СО РАН, доцент кафедры физики физфака и СУНЦ НГУ, г.н.с. лаб. физико-технических основ энергетики НГУ, г. Новосибирск e-mail: <a href="mailto:chernov@itp.nsc.ru">chernov@itp.nsc.ru</a>  <i>Моделирование взрывных вулканических извержений</i></p>
<b>20. Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике</b> <b>6 апреля, 15.00. Физический факультет НГУ, большая аудитория</b>
<p><b>Бураева Елена Анатольевна</b>, к.х.н., доцент, зав. лаб. радиоэкологических исследований, зам. директора НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, e-mail: <a href="mailto:buraeva_elena@mail.ru">buraeva_elena@mail.ru</a>  <i>Развитие радиоэкологических исследований в России и мире</i></p>
<b>21. Проблемы и методологии преподавания физики. История физики и техники.</b> <b>6 апреля, 10.30. Клуб юных техников Академгородка</b>
<p><b>Меренцов Александр Ильич</b>, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН, доцент кафедры физики и астрономии СУНЦ УрФУ, Екатеринбург, e-mail: <a href="mailto:alexander.merentsov@urfu.ru">alexander.merentsov@urfu.ru</a>  <i>Турнир Юных Физиков - путь в науку</i></p>



## Программа визитов ВНКСФ-28

<b>1 апреля 2024, понедельник</b>	
<b>09.30 – 13.00</b>	<b>Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН:</b> - лаборатория наночастиц; - лаборатории Магнитных явлений, - лаборатория химии и физики свободных радикалов (группа Органической фотовольтаики), - лаборатория цитометрии и биокинетики - группа Молекулярной фотодинамики
<b>10.30 – 13.00</b>	<b>Сибирский центр Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета»:</b> - антенные приёмные комплексы; - доклад о целях, задачах и деятельности НИЦ
<b>2 апреля, вторник</b>	
<b>09.00 – 17.00</b>	<b>Экскурсионная программа «Золотая долина» по историческим местам и достопримечательностям Академгородка с визитами (1 группа):</b> <b>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН:</b> - лаборатория синтеза композиционных материалов (отдел быстропротекающих процессов) - взрывная камера ВК-20 «ШАРИК» (отдел быстропротекающих процессов) - лаборатория (отдел) экспериментальной прикладной гидродинамики. - оптомеханическая система для исследования нестационарных гидродинамических процессов вращательного типа - лаборатория механики неупорядоченных сред; - лаборатория биомеханики и многомасштабной механики сложных сред <b>Клуб юных техников (КЮТ) Академгородка</b> <b>Центральный Сибирский геологический музей Института геологии и минералогии СО РАН им В.С. Соболева</b>
<b>3 апреля, среда</b>	
<b>09.00 – 18.00</b> две группы с параллельным посещением	<b>Большая программа визитов по Новосибирскому научному центру:</b> <b>Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН:</b> - Уникальная научная установка (УНУ) «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» - УНУ комплекс длинных открытых ловушек - ДОЛ ( в т.ч. плазменные установки ГОЛ, ГДЛ) - УНУ Протонный ускоритель Тандем-БНЗТ - ЦКП Центр Синхротронного и Терагерцового Излучения (бункер СИ) - Новосибирский лазер на свободных электронах - источник терагерцового и инфракрасного излучения. Действующие станции - Сибирский кольцевой источник фотонов (установки, оборудование СКИФ) <b>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН:</b> - лаборатория №26 физики низкоразмерных электронных систем - лаборатория №18 аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии GaN гетероструктур на подложках кремния для силовых и СВЧ транзисторов - лаборатория №16 молекулярно-лучевой эпитаксии элементарных полупроводников и соединений $A^3B^5$ - лаборатория №20 нанодиагностики и нанолитографии. ЦКП «Наноструктуры» - лаборатория №3 физики и технологии гетероструктур - лаборатория №24 неравновесных полупроводниковых систем - лаборатория №16 молекулярно-лучевой эпитаксии элементарных



	<p>полупроводников и соединений АЗВ5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- лаборатория №7 физики и технологии трехмерных наноструктур</li> <li>- лаборатория №11 нанотехнологий и наноматериалов</li> <li>- лаборатория №14 физических основ интегральной микрофотозлектроники</li> </ul> <p><b>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- дозвуковая аэродинамическая установка,</li> <li>- сверхзвуковая аэродинамическая установка,</li> <li>- лаборатория лазерных технологий.</li> </ul>
<b>4 апреля, четверг</b>	
<b>09.00 – 17.00</b>	<p><i>Экскурсионная программа «Золотая долина» по историческим местам и достопримечательностям Академгородка с визитами (1 группа):</i></p> <p><b>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- лаборатория синтеза композиционных материалов (отдел быстропротекающих процессов)</li> <li>- взрывная камера ВК-20 «ШАРИК» (отдел быстропротекающих процессов)</li> <li>- лаборатория (отдел) экспериментальной прикладной гидродинамики.</li> <li>- оптомеханическая система для исследования нестационарных гидродинамических процессов вращательного типа</li> <li>- лаборатория механики неупорядоченных сред;</li> <li>- лаборатория биомеханики и многомасштабной механики сложных сред</li> </ul> <p><b>Клуб юных техников (КЮТ) Академгородка</b></p> <p><b>Центральный Сибирский геологический музей Института геологии и минералогии СО РАН им В.С. Соболева</b></p>
<b>5 апреля, пятница</b>	
<b>09.00 – 13.00</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (ФИЦ):</b></li> <li>- ознакомительная, вводная часть в конференц-зале;</li> </ul> <p>Отдел физико-химических исследований:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- сканирующий электронный микроскоп (СЭМ)</li> <li>- рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС)</li> <li>- просвечивающий электронный микроскоп с самым высоким разрешением в России, позволяет снимать поверхность образцов на атомарном уровне (ПЭМ)</li> </ul> <p>Инжиниринговый центр:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- опытный химический цех (пр-во полупромышленных серий катализаторов)</li> <li>- лаборатории по разработке каталитических процессов переработки возобновляемого сырья; по разработке и исследованию катализаторов нефтепереработки (отделы гетерогенного катализа, технологии каталитических процессов). - выставочный зал ИК СО РАН.</li> </ul>
<b>14.00 – 18.00</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН:</b></li> <li>- вводная часть в конференц-зале,</li> <li>- лаборатория суперкомпьютерных вычислений и искусственного интеллекта в энергетических технологиях,</li> <li>- лаборатория физико-химических процессов в энергетике,</li> <li>- лаборатория низкотемпературной теплофизики,</li> <li>- лаборатория интенсификации процессов теплообмена</li> <li>- лаборатория процессов переноса в многофазных системах</li> </ul>

## Информация по количеству заявок и докладов по секциям ВНКСФ-28

Секция	заявки	тезисы	Устные доклады*	Обзорные, пленарные	стендовые	заочные
01 - Теоретическая физика. Математическая физика	8	8	5	-	-	3
02 - Физика конденсированного состояния вещества	25	23	5	1	2	16
03 - Физика полупроводников и диэлектриков	17	17	9	3	1	5
04 - Физика атомного ядра и элементарных частиц, высоких энергий.	4	4	2	2	-	2
05 - Электрофизика. Физика плазмы, плазменные технологии.	10	9	7	1	-	2
06- Магнетизм.	14	13	4	-	-	9
07 - Оптика и спектроскопия.	23	22	14	3	2	4
08 - Квантовая электроника и лазерная физика.	3	3	2	-	-	-
09 - Физ. химия, хим. физика.	18	17	14	2	-	3
10 - Астрофизика, физика космоса. Космические технологии	3	3	1	1	1	1
11 - Биофизика, медицинская физика.	12	12	8	1	1	3
12 - Геофизика: земная кора, океан, атмосфера.	6	6	5	1	-	1
13 - Акустика.	2	2	-	-	-	-
14 - Статистическая механика жидкости, газа и плазмы. Молекулярная физика.	2	2	1	-	-	1
15 - Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы. Инженерная механика.	10	9	4	1	1	4
16 - Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы	21	19	17	-	-	2
17 - Радиофизика. Электроника.	26	24	4	-	-	20
18 – Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях.	17	15	7	2	-	6
19 - Теплофизика и теплотехника. Процессы теплообмена.	8	8	7	2	1	-
20 - Физика и экология	8	8	-	1	-	8
21 – Проблемы и методологии преподавания физики. Школьная	15	11	9	1	-	2
Всего, по всем секциям	252 +42	235	134	23	9	86

### Примечания:

- в итоговом количестве заявок ВНКСФ-28 в скобках дополнительно учтено количество ученых, принимающих участие в конференции, но не прошедших регистрацию в базе данных (+42 человек, в том числе 10 онлайн)

**Статистика заявок, тезисов и докладов ВНКСФ-28  
по городам и регионам (с востока на запад)**

Город	заявки	тезисы	очные	заочные
<b>Дальний Восток, Забайкалье</b>				
Владивосток	4	4	0	4
<b>Всего по региону:</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>4</b>
<b>Сибирь</b>				
Иркутск	1	1	1	0
Красноярск	9*	7	6	1
<b>Томск</b>	<b>32*</b>	<b>31</b>	<b>26</b>	<b>5</b>
Кемерово	3	3	1	2
Барнаул	1	1	0	1
<b>Новосибирск</b>	<b>60+18*</b>	<b>60</b>	<b>57</b>	<b>3</b>
<b>Всего по региону:</b>	<b>124</b>	<b>103</b>	<b>91</b>	<b>12</b>
<b>Большой Урал</b>				
<b>Екатеринбург</b>	<b>11*</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
Тюмень	1	1	1	0
<b>Челябинск</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>3</b>
Пермь	2*	-	1	1
Сыктывкар	5	5	5	0
Уфа	17*	14	1	15
Ижевск	4	4	4	0
Октябрьский	1	-	-	-
<b>Всего по региону</b>	<b>44</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>22</b>
<b>Северный регион</b>				
Архангельск	1*	0	0	5
Санкт-Петербург	4	4	3	1
Петрозаводск	3	3	0	3
Великий Новгород	12	11	0	11
<b>Всего по региону</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>3</b>	<b>20</b>
<b>Поволжье</b>				
Нижний Новгород	2	2	0	2
Казань	4	4	0	4
Саратов	1	1	1	0
<b>Всего по региону</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
<b>Центральная часть России</b>				
Дубна	7*	5	5	2
Черноголовка	1	1	1	0
Владимир	1	1	0	1
Москва	5*	4	4	1
<b>Всего по региону:</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>4</b>
<b>Южный регион</b>				
<b>Ростов-на-Дону</b>	<b>55*</b>	<b>42</b>	<b>15</b>	<b>39</b>
Новочеркасск	2*	-	1	1
Ставрополь	1	1	0	1
<b>Всего по региону:</b>	<b>58</b>	<b>43</b>	<b>16</b>	<b>41</b>

<b>Республика Крым</b>				
<b>Научный</b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>0</i></b>
<b><i>Киргизия</i></b> <sup>***</sup>				
<b>Бишкек (Томск)</b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>0</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>Китай</i></b> <sup>***</sup>				
<b>Новосибирск</b>	<b><i>2</i></b>	<b><i>2</i></b>	<b><i>2</i></b>	<b><i>0</i></b>
<b><i>Зимбабве</i></b> <sup>***</sup>				
<b>Ростов-на-Дону</b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>1</i></b>	<b><i>0</i></b>

**Примечания:**

- все города внутри региона расположены не по алфавиту, а по географическому расположению с востока на запад (примерно);
- \* в количество очных участников также входят члены оргкомитета и научного комитета конференции, поэтому оно может отличаться от количества докладов (как правило в большую сторону). Эта цифра отмечена звездочкой
- \*\* в некоторых случаях один человек может представить два доклада, в количество докладов также включены доклады ученых от данного города, которые не проходят общую регистрацию (приглашенные докладчики)
- жирным шрифтом выделены города – лидеры по количеству участников в своих регионах.
- \*\*\* - указаны иностранные студенты, обучающиеся в России

Статистика конференций ВНКСФ в переходе до-ковидный и пост-ковидный период

<b>ВНКСФ</b>	<b>28</b>	<b>27</b>	<b>26</b>	<b>25</b>
<b>год</b>	<b>2024</b>	<b>2023</b>	<b>2020</b>	<b>2019</b>
<b>место проведения</b>	<b>Новосибирск</b>	<b>Екатеринбург</b>	<b>Магнитогорск (план)</b>	<b>Севастополь</b>
стран	4*	2	1	4
городов	29	28	35	50
ВУЗов	40	28	55	64
НИИ и НИЛ	27	21	15	26
<b>заявок на участие</b>	<b>251</b>	<b>210</b>	<b>318</b>	<b>384</b>
<b>принятых тезисов</b>	<b>235</b>	<b>204</b>	<b>289</b>	<b>331</b>
Очных участников*	<b>153</b>	<b>50/63</b>	169	231
<b>Участвующих ученых**</b>	<b>42 (+10)</b>	<b>39</b>	<b>82</b>	<b>81</b>
Конкурсных докладов*	134	113	180	220
<b>Обзорных и пленарных**</b>	<b>25</b>	<b>21</b>	<b>58</b>	<b>71</b>
<b>из них заявок:</b>				
Россия	247	210	318	378
Китай	2	4*	1*	1
Киргизия	1			
Вьетнам				2
Зимбабве	1			
Европейская часть России	34	12	5	34
Поволжье	7	3	18	17
Южный регион	58	47	47	67
Урал	44	86	176	80
Сибирь	124	56	50	121
Дальний восток	2	7	6	7
Республика Крым, Севастополь	1	0	5	56
<b>по возрасту</b>	<b>ВНКСФ-28</b>	<b>ВНКСФ-27</b>	<b>ВНКСФ-26</b>	<b>ВНКСФ-25</b>
школьников	9	-	-	3
1 курс	9	7	15	17
2 курс	24	10	22	29
3 курс	21	19	27	42
4 курс	49	54	79	51
5 курс, маг 1*	63	32	45	77
6 курс, маг 2*	31	15	36	44
аспирант 1-2*	34	26	27	39-14
аспирант 3-4*	4	10	16	9-3
прочих	38	37	52	61
из них:				
женщин	88	111	146	198
Средний возраст	22	22	22,3	23,1

Статистика всех конференций ВНКФ 1 – 27

ВНКФ	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
	2023	2020	2019	2018	17	16	15	14	13	12	11	2010	09	08	07	06	05	04	03	02	01	2000	99	96	95	94	93	
стран	2	1	4	5	3	2	2	7	5	6	5	7	6	7	6	7	6	5	2	3	5	1	1	3	6	5	2	
городов	28	35	50	41	42	54	51	60	62	67	63	84	79	72	75	76	69	77	65	58	69	33	24	27	33	29	27	
ВУЗов	28	55	64	52	54	64	63	76	79	106	90	122	119	108	101	100	99	117	66	72	98	40	30	32	39	38	20	
НИИ и НИЛ	21	15	26	20	24	21	27	31	37	32	35	42	40	44	38	46	44	46	34	37	21	7	4	3	5	7	2	
<b>заявок на участие</b>	<b>210</b>	<b>318</b>	<b>384</b>	<b>466</b>	<b>432</b>	<b>478</b>	<b>448</b>	<b>475</b>	<b>383</b>	<b>496</b>	<b>483</b>	<b>655</b>	<b>694</b>	<b>588</b>	<b>611</b>	<b>685</b>	<b>664</b>	<b>825</b>	<b>773</b>	<b>496</b>	<b>650</b>	<b>315</b>	<b>221</b>	<b>142</b>	<b>159</b>	<b>130</b>	<b>58</b>	
<b>принятых тезисов</b>	<b>204</b>	<b>289</b>	<b>331</b>	<b>401</b>	<b>343</b>	<b>396</b>	<b>380</b>	<b>422</b>	<b>336</b>	<b>472</b>	<b>455</b>	<b>562</b>	<b>623</b>	<b>486</b>	<b>497</b>	<b>581</b>	<b>516</b>	<b>649</b>	<b>540</b>	<b>338</b>	<b>464</b>	<b>240</b>	<b>173</b>	<b>133</b>	<b>120</b>	<b>117</b>	<b>61</b>	
Очных участников*	50/63	169	231	287	218	280	207	183	188	271	227	254	284	248	262	295	250	320	190	130	300	90	60	50	140	120	60	
Участвующих ученых**	39	82	81	98	83	110	52																					
Конкурсных докладов*	113	180	220	305	221	288	376	411	324	465	449	544	606	473	491	580	516	649	540	338	464	240	173	133	120	117	61	
Обзорных и пленарных**	21	58	71	91	60	78	28																					
<b>из них заявок:</b>																												
Россия	210	318	378	458	428	475	373	466	376	451	441	531	577	461	474	561	490	637	536	334	444		173	129	111	110	55	
Белоруссия				4	1	3	3	1		1	3	5	9	4	4	7	15	3	4	3	8		0	0	1	5	0	
Казахстан			1					5	2	7	1	2	8	2	8	8	8	2										
Армения									1	2				2														
Азербайджан										1																		
Украина			2					1	7		3	6	9	0	2	2	2	3								3	3	
Киргизстан														3	3	1	1	1										
Узбекистан				2	3			2	2	3	2			0	1	1	1	1										
США, Канада									1					1		1										1		
страны Европы													1				1											
Китай	4*	1*	1	2																								
Вьетнам			2	1																								
Европейская часть России	12	5	34	28	33	47	26	76	96	52	60	77	89	65	81	84	28		91	166	283		120	61	77	56	27	
Поволжье	3	18	17	12	21	39	19	43	31	32	54	99	39	31	46	63	28		22	*	*		*	*	*	*	*	
Южный регион	47	47	67	46	79	233	62	67	46	29	41	65	47	32	89	83	71		68	*	*		*	*	*	*	*	
Урал	86	176	80	76	175	94	95	153	91	84	147	122	106	182	106	101	90		70	168	161		53	66	34	54	28	
Сибирь	56	50	121	273	108	54	163	108	90	237	130	130	261	126	142	198	157		269	**	**		**	**	**	**	**	

Дальний восток	7	6	7	13	9	10	15	20	24	29	22	37	33	22	27	27	19		17	**	**		**	**	**	**	**	
Республика Крым, Севастополь	0	5	56	7	6	6	5																					
<b>ВНКСФ, №</b>	<b>27</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>24</b>	<b>23</b>	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	
<b>Распределение заявок по возрасту участников</b>																												
школьников	-	-	3	2	2	-	1	-	-	4	1	1	5	1	2		1	2	2	1	0	6	0	0	0	0	1	0
1 курс	7	15	17	23	12	4	6	5	4	2	3	1	2	1	1	4	5	6	13	8	0	5	4	1	0	1	0	
2 курс	10	22	29	43	30	30	17	27	8	5	10	12	10	11	11	10	7	14	24	16	7	22	4	5	5	3	1	
3 курс	19	27	42	48	49	33	53	29	19	34	23	15	24	19	27	29	16	53	25	20	20	24	18	6	15	10	4	
4 курс	54	79	51	97	83	112	79	58	36	64	52	70	87	52	59	86	55	84	73	55	45	52	36	29	34	24	17	
5 курс, маг 1*	32	45	77	58	75	76	39	44	46	49	65	89	131	84	122	84	82	152	135	87	31	0	38	50	52	41	40	
6 курс, маг 2*	15	36	44	55	52	46	12	6	20	27	30	43	37	25	32	56	21	53	43	22	50	0	10	5	7	6	2	
аспирант 1-2*	26	27	39-14	54	46	31	80	61	65	65	62	63	36	32	26	21	52	52	43	52	69	116	17	0	0	0	0	
аспирант 3-4*	10	16	9-3	28	24	33	99	117	88	150	143	163	164	152	135	169	193	280	289	175	197	69	64	35	35	28	14	
прочих	37	52	61	51	54	77	69	77	97	63	61	87	101	96	76	75	74	130	126	60	20	18	4	2	6	4	1	
из них:																												
женщин	111	146	198	202	170	219	176	177	144	187	167	201	244	183	177	178	178	300	248	161	113	85	46	23	26	23	15	
Средний возраст	99	22,3	23,1	23	22,1	22,5	23,2	23,6	23,7	23,5	23,8	24	23	24	24,2	22	23	23	22	23	24,7	23,4	23	23,5	21,6	22,3	22	

Примечания:

В статистике конференций ВНКСФ 1–8 по регионам:

- в Европейскую часть России входили Поволжский и Южный регионы (\*), а Урал, Сибирь и Дальний Восток были объединены в один регион (Азиатская часть России) (\*\*);
- в «Европейскую часть» РФ входят т.н. Центральный и Северный федеральные округа;
- к Дальневосточному региону здесь также относится Якутия.

- в 2023 году в строке «очные доклады» перед дробью указаны очные участники, а после дроби – участники выступавшие через интернет (онлайн)

**По количеству участников по форме участия:**

- в очные участники входят участники с полным пансионом (иногородние) и с неполным пансионом (местные, или иногородние на неполный срок)
- в количество конкурсных докладов входят устные и стендовые доклады (с 2016 года, до этого года – сюда входили и заочные участники)
- с 2015 года в статистику включается также количество ученых, которые принимали участие в конференции без регистрации в базе данных (участие в работе научного жюри, лекции и т.д.). Это количество ученых идет ДОПОЛНИТЕЛЬНО к общему количеству участников конференции
- с 2015 года в статистику включаются обзорные и пленарные доклады ученых (дополнительное количество докладов, вне регистрации), данная информация по прошлым конференциям будет заполняться постепенно, по архивным данным

**По участникам по возрастам и категориям учащихся:**

- с 2016 года 5 курс объединен с магистрантами 1 года обучения
- с 2016 года 6 курс объединен с магистрантами 2 года обучения
- с 2016 года аспиранты разделены на две возрастные категории: 1-2 года обучения и 3-4 года обучения

## 1-Теоретическая физика. Математическая физика

Абакумова Виктория Александровна, доцент  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физический факультет  
**Теории с несвободно-порождённой калибровочной симметрией**  
e-mail: [victoriaabakumova@gmail.com](mailto:victoriaabakumova@gmail.com) стр. 36

Гаврилова Анна Михайловна, магистрант 1 года обучения  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, ИМИТиФ  
**Исследование движения эллиптического профиля с закреплённой точечной особенностью**  
e-mail: [ann.gavrilova5@mail.ru](mailto:ann.gavrilova5@mail.ru) стр. 37

Лагунов Данил Аркадьевич, 4 курс  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, Институт математики, информационных технологий и физики  
**Движение эллиптического профиля в присутствии неподвижной точечной особенности**  
Артемова Елизавета Марковна,  
e-mail: [ldegos23@gmail.com](mailto:ldegos23@gmail.com) стр. 38

Петров Павел Константинович, аспирант 4 года обучения  
Москва, Институт ядерных исследований Российской академии наук, ОТФ ИЯИ РАН  
**Вселенная с отскоком в рамках теории Хорндески. Самосогласованность классического описания**  
Миронов Сергей Андреевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [pavelkpetrov@mail.ru](mailto:pavelkpetrov@mail.ru) стр. 39

Фроловский Даниил Валерьевич, магистрант 2 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физический факультет  
**Формирование первичных черных дыр в E-моделях инфляции**  
Кетов Сергей Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [daniylfrolovsky@yandex.kz](mailto:daniylfrolovsky@yandex.kz) стр. 40

Харипова Диана Ильдаровна, 2 курс  
Уфа, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Институт физики, математики, цифровых и нанотехнологий  
**Угол отклонения света черными дырами из теории струн с T-дуальностью в слабом гравитационном поле**  
Каримов Рамис Хамитович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [kharipova.dream9@gmail.com](mailto:kharipova.dream9@gmail.com) стр. 42

Шебелева Анна Андреевна, н.с.  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
**Численное исследование темпа деформации капли топлива в процессе её разрушения**  
e-mail: [an\\_riv@mail.ru](mailto:an_riv@mail.ru) стр. 42

Юсупова Розалия Мансуровна, м.н.с.  
Уфа, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Институт физики, математики, цифровых и нанотехнологий  
**Исследование приливных сил в пространстве-времени фантомной кротовой норы Лобо-Персей-Риази**  
e-mail: [yu.rose@mail.ru](mailto:yu.rose@mail.ru) стр. 43



## Теории с несвободно-порождённой калибровочной симметрией

*Абакумова Виктория Александровна*

*Ляхович Семен Леонидович*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*[abakumova@phys.tsu.ru](mailto:abakumova@phys.tsu.ru)*

Теории с несвободно-порождённой калибровочной симметрией представляют собой класс теорий, калибровочные параметры которых не являются произвольными функциями пространственно-временных координат, а подчинены системе дифференциальных уравнений,

$$\delta_\varepsilon \varphi^i = \Gamma_\alpha^i \varepsilon^\alpha, \quad \delta_\varepsilon S(\varphi) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \Gamma_\alpha^a(\varphi) \varepsilon^\alpha = 0. \quad (1)$$

В качестве примеров теорий с данным типом симметрии можно упомянуть унимодулярную гравитацию, параметры которой подчинены условию бездивергентности, различные её модификации [1], [2], модели полей высших спинов с трансверсальной симметрией [3] и максвеллоподобные модели полей высших спинов [4].

Проблема рассматриваемого класса теорий состоит в том, что стандартный общий формализм калибровочных теорий не учитывает такие особенности теорий с несвободно-порождённой калибровочной симметрией, как существование связей на калибровочные параметры (1), а также функций пополнения, обращающихся в нуль на уравнениях движения, но не являющиеся их дифференциальными следствиями,

$$T_a(\varphi, \Lambda) \equiv \tau_a(\varphi) - u_a(\Lambda), \quad u_a(\Lambda) = \Lambda_I u_a^I, \quad I = 1, \dots, k, \quad T_a \neq \partial_i S(\varphi) \Theta_a^i. \quad (2)$$

Исходным пунктом для исследования теорий с несвободно-порождённой калибровочной симметрией являются модифицированные тождества Нётер, связывающие между собой основные составляющие несвободно-порождённой калибровочной алгебры,

$$\partial_i S(\varphi) \Gamma_\alpha^i(\varphi) + \tau_a(\varphi) \Gamma_\alpha^a(\varphi) = 0, \quad (3)$$

где  $\Gamma_\alpha^i$  – генераторы калибровочной симметрии,  $\tau_a$  – локальные функции (2),  $\Gamma_\alpha^a$  – генераторы связей на калибровочные параметры. Существенным является тот факт, что оператор связей на калибровочные параметры обладает не более чем конечномерным ядром,

$$u_a \Gamma_\alpha^a(\varphi) = 0 \quad \Rightarrow \quad u_a \in K = \text{Ker } \Gamma_\alpha^a, \quad \dim K = k. \quad (4)$$

Общая структура несвободно-порождённой калибровочной алгебры впервые была описана в работе [5], расширение БВ-формализма для данного класса теорий было предложено в работе [6]. Однако то, как уравнения на калибровочные параметры возникают с точки зрения алгебры гамильтоновых связей, долгое время оставалось неясным даже для модели унимодулярной гравитации, что отмечалось в литературе [7]. В настоящей работе изучается то, как несвободно-порождённая калибровочная симметрия проявляет себя на гамильтоновом уровне. Разработан гамильтонов формализм со связями любого конечного поколения для теорий поля общего вида с несвободно-порождённой калибровочной симметрией, в том числе общая гамильтонова процедура получения дифференциальных уравнений, ограничивающих калибровочные параметры. Также предложено обобщение гамильтонового БФВ-БРСТ формализма для теорий поля с данным типом симметрии.

Одной из особенностей теорий с несвободно-порождённой калибровочной симметрией является существование глобальных сохраняющихся величин, значения которых определяются асимптотиками полей и их производных. Простейшим примером такой величины является космологическая постоянная в модели унимодулярной гравитации. В работе предложена систематическая процедура построения глобальных сохраняющихся величин, исходя из уравнений связей на калибровочные параметры. Также найдены неизвестные ранее аналоги космологической постоянной для безмассовых полей высших спинов с несвободно-порождённой калибровочной симметрией. Показано, что количество таких величин растёт с увеличением спина.

Известно, что любая теория с несвободно-порождённой калибровочной симметрией может быть описана в терминах приводимой симметрии с параметрами, не ограниченными связями [8]. В настоящей работе связь между двумя параметризациями преобразований симметрии установлена с точки зрения гамильтонова формализма. Также установлена связь между соответствующими БРСТ комплексами, неэквивалентность которых обусловлена различным статусом глобальных сохраняющихся величин по отношению к различным вариантам БРСТ симметрии. Так, например, БРСТ комплекс, связанный с несвободно-порождённой калибровочной симметрией, лучше подходит для изучения динамики с фиксированными модулярными

параметрами, в то время как БРСТ комплекс, основанный на приводимой симметрии, применяется, если асимптотики полей не фиксированы. Таким образом, выбор между двумя этими неэквивалентными БРСТ комплексами зависит от физической постановки задачи.

Полученные результаты опубликованы в работах [9]–[15], а также представлены в диссертации [16].

Список публикаций:

- [1] Barvinsky A. O., Kamenshchik A. Yu. // *Phys. Lett. B.* 2017. Vol. 774. P. 59–63.  
 [2] Barvinsky A. O., Kolganov N., Kurov A., Nesterov D. // *Phys. Rev. D.* 2019. Vol. 100(2). P. 023542.  
 [3] Skvortsov E. D., Vasiliev M. A. // *Phys. Lett. B.* 2008. Vol. 664. P. 301–306.  
 [4] Campoleoni A., Francia D. // *JHEP.* 2013. Vol. 1303. P. 168.  
 [5] Kaparulin D. S., Lyakhovich S. L. // *Nucl. Phys. B.* 2019. Vol. 947. P. 114735.  
 [6] Kaparulin D. S., Lyakhovich S. L. // *Eur. Phys. J. C.* 2019. Vol. 79(2). P. 718.  
 [7] Gielen D., de Leon Ardon R., Percacci R. // *Class. Quant. Grav.* 2018. Vol. 35(19). P. 195009.  
 [8] Francia D., Lyakhovich S. L., Sharapov A. A. // *Nucl. Phys. B.* 2014. Vol. 881. P. 248–268.  
 [9] Abakumova V. A., Karataeva I. Yu., Lyakhovich S. L. // *Phys. Lett. B.* 2020. Vol. 802. P. 135208.  
 [10] Abakumova V. A., Lyakhovich S. L. // *Phys. Rev. D.* 2020. Vol. 802. P. 135208.  
 [11] Абакумова В. А., Ляхович С. Л. // *Учен. зап. физ. фак-та Моск. Ун-та.* 2021. № 1. С. 2111503.  
 [12] Abakumova V. A., Lyakhovich S. L. // *AIP Conference Proceedings.* 2021. Vol. 2377(1). P. 090001.  
 [13] Abakumova V. A., Karataeva I. Yu., Lyakhovich S. L. // *Nucl. Phys. B.* 2021. Vol. 973. P. 115577.  
 [14] Abakumova V. A., Lyakhovich S. L. // *PEPAN Lett.* 2022. Vol. 19(5). P. 451–453.  
 [15] Abakumova V. A., Lyakhovich S. L. // *PEPAN.* 2023. Vol. 54(5). P. 950–956.  
 [16] Абакумова В. А. *Калибровочные теории с высшими производными и несвободно-порождёнными симметриями: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Томск, 2023. – 139 с.*

## Исследование движения эллиптического профиля с закрепленной точечной особенностью

**Гаврилова Анна Михайловна**

*Артемова Елизавета Марковна*

Удмуртский государственный университет

[Ann.gavrilova5@mail.ru](mailto:Ann.gavrilova5@mail.ru)

Рассмотрим систему, состоящую из движущегося эллиптического профиля с полуосями  $a$ ,  $b$  и закрепленной к нему точечной особенностью (вихрь интенсивности  $\Gamma$ ) (рис.1, слева) в идеальной жидкости. Изучение задачи именно в такой постановке связано с тем, что в численных расчетах при обтекании профиля за ним всегда образуются вихри. Поскольку в рамках идеальной жидкости возникновение вихрей невозможно, то мы искусственно вводим вихрь, который расположен рядом с эллипсом.

Отнесем это движение к некоторой неподвижной (инерциальной) системе координат  $Oxy$ . Также введем подвижную систему координат  $O'x'y'$  в плоскости  $z$ , неизменно связанную с эллипсом.

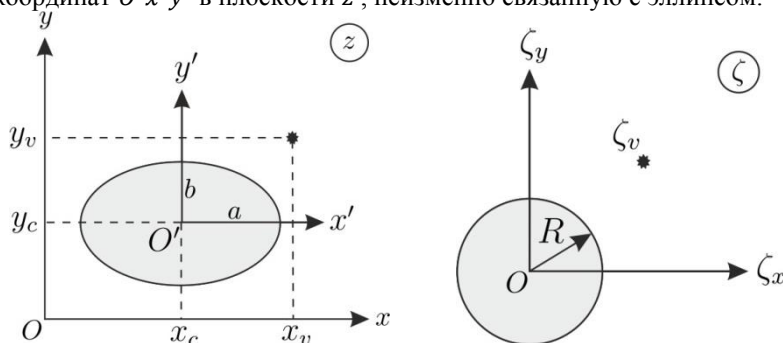


рис.1. Схематическое изображение эллиптического и кругового профилей

В рассматриваемой постановке движение жидкости, окружающей тело, может быть описано комплексным потенциалом

$$W = -\frac{U_1}{2\zeta}(R^2 - c^2) - \frac{iU_2}{2\zeta}(R^2 + c^2) - \frac{i\omega c^2 R^2}{4\zeta^2} - \frac{i\Gamma}{2\pi} \ln(\zeta - \zeta_v) + \frac{i\Gamma}{2\pi} \ln \frac{\zeta - \zeta_v^*}{\zeta}, \quad (1)$$

где  $U_1$ - поступательная скорость движения центра масс эллиптического цилиндра в направлении оси  $Ox'$ ,  $U_2$ - скорость в направлении оси  $Oy'$ ,  $\omega$ - угловая скорость.  $\zeta_v$ - положение вихря в плоскости  $\zeta$ ,  $\zeta_v^* = \frac{R^2}{\zeta_v}$ .

Отметим, что при построении потенциала (1) мы использовали метод конформных отображений и перешли от эллипса к кругу радиуса  $R$ , центр которого расположен в начале вспомогательной системы координат  $O\zeta_x\zeta_y$  (рис.1, справа). Точки  $\zeta = \zeta_x + i\zeta_y$  данной плоскости отображаются на  $z$  плоскость с помощью преобразования Жуковского

$$z = \frac{1}{2} \left( \zeta + \frac{c^2}{\zeta} \right).$$

В данной задаче считаем, что интенсивность вихря в общем случае зависит от времени и жидкость на бесконечности покоится. В выражении (1) первые три слагаемых есть классический потенциал для движущегося профиля, четвертое слагаемое описывает течение, создаваемое особенностью. Последнее слагаемое задает течение от инверсного образа и центрального вихря, возникающих внутри цилиндра вследствие теоремы Милна-Томсона [2].

Используя формулы предложенные Л.И. Седовым [1] и потенциал (1), можно получить явные выражения для комплексной силы и момента гидродинамических сил, а далее построить уравнения движения данной системы. Уравнения движения Ньютона-Эйлера

$$\dot{U}_1 = \frac{Re(F) + mU_2\omega}{m + \rho\pi b^2}, \quad \dot{U}_2 = \frac{Im(F) - mU_1\omega}{m + \rho\pi a^2}, \quad \dot{\omega} = \frac{8M}{\rho\pi c^4 + 8I}, \quad (2)$$

где  $m$  - масса профиля,  $\rho$  - плотность жидкости,  $I$  - момент инерции,  $F = F_x + iF_y$  - сила, действующая на тело, с исключением слагаемых связанных с  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ ,  $M$  - момент силы, с исключением слагаемого с  $\dot{\omega}$ . Отметим, что в выражении (2) знаменатели обусловлены эффектом присоединенных масс.

Данные выражения необходимо дополнить кинематическими соотношения

$$\begin{aligned} \dot{x} &= U_1 \cos \varphi - U_2 \sin \varphi, \\ \dot{y} &= U_1 \sin \varphi + U_2 \cos \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\varphi$  - угол поворота эллипса в плоскости  $Oxy$ .

Полученная система (2) и (3) описывает движение эллиптического профиля с закрепленным к нему точечным вихрем. В уравнения (2) координаты  $x$ ,  $y$  и угол  $\varphi$  явно не входят, поэтому данную систему можно исследовать отдельно. Показано, что в случае с фиксированным положением особенности постоянной интенсивности относительно эллипса система (2) автономна и представляет собой систему из трех дифференциальных уравнений с квадратичной правой частью. Показано, что существует два частных случая, в которых данная система допускает дополнительный первый интеграл. Во всех остальных случаях численный анализ показывает, что как минимум одна из фазовых переменных демонстрирует неограниченный рост.

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FEWS-2024-0007).

Список публикаций

- [1] Sedov L. I. *Two-Dimensional Problems in Hydro- and Aeromechanics*. Ed. 2-th. Gostechizdat. 1950. (in Russian).  
 [2] Milne-Thomson L.M. *Theoretical hydrodynamics*, 4th ed., Macmillan & Co. LTD, 1962.

## Движение эллиптического профиля в присутствии неподвижной точной особенности

*Лагунов Данил Аркадьевич*

*Удмуртский государственный университет*

*Уральский математический центр*

*Артемова Елизавета Марковна*

*[1deqos23@gmail.com](mailto:1deqos23@gmail.com)*

Рассматривается плоскопараллельное движение эллиптического профиля в идеальной несжимаемой жидкости в присутствии точечной особенности. Далее приняты следующие допущения:

1. Движение жидкости потенциально, на бесконечности жидкость покоится.
2. В жидкости присутствует неподвижный вихреисточник с интенсивностью  $q$  и циркуляцией  $\Gamma$
3. Эллиптический профиль уравновешенный, его движение бесциркуляционное.

Для описания движения эллиптического профиля введены две системы координат (рис. 1а): неподвижная  $OXY$  и подвижная  $Sxy$ , связанная с эллиптическим профилем. Геометрический центр эллипса относительно неподвижной системы координат  $OXY$  находится в точке  $(X_c, Y_c)$ , ориентацию эллипса зададим углом  $\varphi$  между положительным направлением осей  $OX$  и  $Sx$ . Положение вихреисточника в неподвижной системе координат зададим как  $(X_q, Y_q)$ , а в подвижной --  $(x_q, y_q)$ .

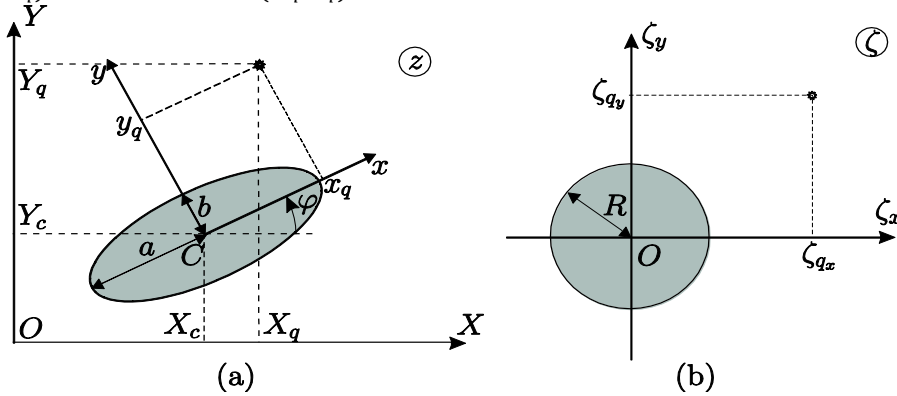


рис.1 Изображение рассматриваемой системы

Описывать движение жидкости будем с помощью комплексного потенциала. Его построение производилось с помощью метода конформных отображений. Для этого с подвижной системой координат  $Sxy$  свяжем комплексную плоскость  $z = x + iy$  и введем  $\zeta$  - плоскость, связанную с круговым профилем радиуса  $R = \frac{a+b}{2}$  (см. рис. 1б).

Конформное отображение (преобразование Жуковского) имеет вид

$$z = \zeta + \frac{c^2}{\zeta}, \quad c^2 = \frac{a^2 - b^2}{4}, \quad (1)$$

переводит внешность круга в  $\zeta$ -плоскости на внешность эллипса в  $z$ -плоскости, граница эллипса является образом окружности.

Комплексный потенциал описывающий движение жидкости в  $\zeta$  - плоскости

$$w(\zeta) = -\frac{u_1(R^2 - c^2)}{\zeta} - \frac{iu_2(R^2 + c^2)}{\zeta} - \frac{i\omega c^2 R^2}{\zeta^2} + \frac{\bar{\gamma}}{2\pi} \ln(\zeta - \zeta_q) + \frac{\gamma}{2\pi} \ln\left(\frac{R^2}{\zeta} - \bar{\zeta}_q\right), \quad (2)$$

где  $\zeta = \zeta_x + i\zeta_y$  -- комплексная координата точки жидкости,  $\gamma = q + i\Gamma$  -- характеристика вихреисточника,  $\zeta_q = \zeta_{qx} + i\zeta_{qy}$  -- комплексная координата вихреисточника в  $\zeta$ -плоскости,  $u_1$  и  $u_2$  -- проекция скорости центра масс эллипса на оси  $Sx$  и  $Sy$  соответственно,  $\omega$  -- угловая скорость эллипса.

Далее с помощью комплексного потенциала были построены уравнения движения уравновешенного эллиптического профиля в поле неподвижной точечной особенности. Уравнения движения профиля представлены в лагранжевой форме, указан первый интеграл, соответствующий закону сохранения кинетического момента. Выполнена редукция на фиксированный уровень кинетического интеграла момента, указан эффективный потенциал редуцированной системы. Найдены неподвижные точки редуцированной системы, соответствующие неустойчивым движениям профиля вокруг особенности по круговой траектории.

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (FEWS-2024-0007).

## Вселенная с отскоком в рамках теории Хорндески

### Самосогласованность классического описания

*Петров Павел Константинович*

*Институт ядерных исследований Российской академии наук*

*Миронов Сергей Андреевич, к.ф.-м.н.*

[pavelkpetrov@mail.ru](mailto:pavelkpetrov@mail.ru)

Доклад основан на работе [1]. Будет рассмотрен вопрос о построении, в рамках теории Хорндески, космологической стадии сжатия, которая впоследствии может перейти через отскок к реалистичному космологическому расширению, как подробно обсуждается, например, в работе [2]. Этот этап способен

обеспечить экспериментально согласованный скалярный спектр мощности и достаточно малое  $\gamma$  - отношение. Почти плоский спектр получается за счет небольшой подстройки параметров модели, в то время как малое  $\gamma$  требует малой скалярной скорости звука. Последнее свойство находится в потенциальном противоречии с требованием слабой связи во время генерации скалярных возмущений: малые скалярные скорости звука увеличивают парциальные амплитуды и изменяют соотношение унитарности, которое нарушается при энергиях, опасно близких к энергетическому масштабу классической эволюции. Таким образом, очень малые значения  $\gamma$  - отношения невозможны в данном классе моделей.

В то время как мотивация проистекает из интереса к построению полных, свободных от сингулярностей космологий, начальная стадия Вселенной с отскоком конформно эквивалентна быстро расширяющейся Вселенной, и, действительно, красный спектр получается в модели, конформно эквивалентной  $G$  -инфляции [3]. Это наблюдение важности проблемы квантовой сильной связи может иметь отношение к моделям  $G$ -инфляции и, возможно, также  $k$ -инфляции.

Мы строим конкретную модель Вселенной с отскоком в теории Хорндески. В рамках этой модели мы показываем, что спектры космологических возмущений, совпадающие с экспериментальными, могут быть сгенерированы в раннюю эпоху сжатия. Малость  $\gamma$ -отношения определяется малостью скалярной скорости звука. Произвольно малые значения  $\gamma$ -отношения запрещены в нашей модели из-за возможности наличия режима сильной связи в прошлом. Тем не менее мы показываем, что возможно сгенерировать возмущения контролируемым образом, то есть в режиме, где фоновая эволюция описывается в рамках классической теории поля и слабосвязанной квантовой теории.

Список публикаций:

- [1] Y. Ageeva, P. Petrov and V. Rubakov, "Generating cosmological perturbations in non-singular Horndeski cosmologies," *JHEP* 01 (2023), 026.  
 [2] Y. Ageeva, P. Petrov and V. Rubakov, "Nonsingular cosmological models with strong gravity in the past," *Phys. Rev. D.* 104 (2021) no.6, 063530.  
 [3] T.-Kobayashi, M.-Yamaguchi and J.-Yokoyama, "G-inflation: Inflation driven by the Galileon field," *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010), 231302

## Формирование первичных черных дыр в $E$ -моделях инфляции

**Фроловский Даниил Валерьевич**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*Кетов Сергей Владимирович, д.ф.-м.н.*

*[daniylfrolovsky@yandex.kz](mailto:daniylfrolovsky@yandex.kz)*

Парадигма космологической инфляции, предложенная Гуттом и Линде [1,2] является возможным ответом на внутренние проблемы стандартной космологии Эйнштейна-Фридмана. Инфляция как механизм усиления возмущений кривизны также является возможной причиной структурообразования в ранней Вселенной. Существование инфляции подтверждается измерениями космического микроволнового фонового излучения.

Измерения реликтового излучения открывают небольшое окно в физику высоких энергий в форме спектра мощности возмущений в ограниченных масштабах космического микроволнового фонового излучения и приводят к важным ограничениям на жизнеспособные инфляционные модели, но не позволяют реконструировать уникальную базовую инфляционную модель. Существуют неопределенности даже среди простейших однополевых квинтэссенционных моделей инфляции в форме канонического скалярного потенциала инфляции. Эти неопределенности можно использовать, чтобы получить больше возможностей для однополевых инфляционных моделей за счет расширения гибкости в их предсказаниях относительно инфляции. При этом можно описать образование первичных черных дыр в результате коллапса больших скалярных возмущений на более низких, чем реликтовые, масштабах. Стандартный механизм образования первичных черных дыр подразумевает добавление точки перегиба к скалярному потенциалу инфляции. Ограничения наблюдений на первичные черные дыры также подвержены неопределенностям даже в ограниченном контексте однополевых моделей инфляции с точкой, близкой к точке перегиба. Следовательно, имеет смысл исследовать степень гибкости в отношении тонкой настройки в хорошо мотивированных моделях инфляции и формирование первичных черных дыр в каждом конкретном случае.

В настоящей работе рассматриваются однополевые инфляционные модели  $\alpha$  -аттрактора, введенные в работах [3,4]. Рассматривается потенциал поля инфлатона следующего вида:

$$V(\phi) = \frac{3}{4} M_{Pl}^2 M^2 (1 - y - \Theta y^{-2} + y^2 (\beta - \gamma))^2, \quad (1)$$

где

$$\beta = \frac{1}{1-\xi^2} \exp\left(\sqrt{\frac{2}{3\alpha}} \phi_i / M_{Pl}\right), \quad \gamma = \frac{1}{3(1-\xi^2)} \exp\left(2\sqrt{\frac{2}{3\alpha}} \phi_i / M_{Pl}\right). \quad (2)$$

Два вещественных параметра  $(\phi_i, \xi)$  имеют вполне определенный смысл: при  $\xi = 0$  потенциал имеет точку перегиба только при  $\phi = \phi_i$ ; в случае, когда  $0 < \xi \ll 1$  потенциал имеет также локальный минимум и локальный максимум в точке  $y_{ext.}^\pm$  соответственно, а оба экстремума одинаково удалены от точки перегиба,

$$y_{ext.}^\pm = y_i(1 \pm \xi), \quad y_i = \exp\left(-\sqrt{\frac{2}{3\alpha}} \phi_i / M_{Pl}\right). \quad (3)$$

Знание положения  $k$  пика в спектре мощности скалярных возмущений, получаемом из численного решения уравнения Муханова-Сасаки [5,6], позволяет оценить массы  $M(k)$  образующихся первичных черных дыр:

$$\frac{M(k)}{M_{Sun}} \cong 10^{-16} \left(\frac{k}{10^{14} \text{Mpc}^{-1}}\right)^{-2}, \quad (4)$$

где  $M_{Sun}$  – масса Солнца,  $M_{Sun} = 1,998 \cdot 10^{33}$  г. Например, для значения положения пика  $k_{peak} \approx 10^9 \text{Mpc}^{-1}$  получаем массу первичных черных дыр

$$M_{PBH} \approx 10^{-7} M_{Sun} \approx 1,74 \cdot 10^{26} \text{ г}. \quad (5)$$

Данное значение массы находится в интервале между массой Луны,  $M_{Moon} = 7,34 \cdot 10^{25}$  г, и массой Земли,  $M_{Earth} = 5,97 \cdot 10^{27}$  г. Массу  $M_{PBH}$  (4) следует понимать как максимальную массу первичных черных дыр, возможную в рассматриваемых классических  $E$ -моделях после предельно точной настройки параметров при условии сохранения согласия с результатами измерений космического микроволнового фонового излучения [7]. Полученные результаты приведены в таблице 1.

$\phi_{in} / M_{Pl}$	$n_s$	$\alpha$	$\theta$	$r$	$\xi$	$M_{PBH}$
3,886	0,96498	0,74256	$-2,6 \cdot 10^{-6}$	0,03196	0,01213	$1,7 \cdot 10^{26}$ Г
3,9	0,96494	0,74260	$-2,5 \cdot 10^{-6}$	0,30898	0,01213	$8 \cdot 10^{25}$ Г
4,2	0,96496	0,74250	$-8,2 \cdot 10^{-8}$	0,01569	0,01213	$5 \cdot 10^{19}$ Г

Таблица 1. Значения наклонов реликтового излучения  $n_s$  и  $r$ , значения параметров и масс первичных черных дыр в рассматриваемых однополевых инфляционных  $E$ -моделях с потенциалом (1)

Таким образом, полученные значения наклонов спектра и тензорно-скалярного отношения согласуются с измерениями космического микроволнового фона. Массы первичных черных дыр достаточны для того, чтобы они полностью не испарились и могли сформировать большую часть темной материи.

Список публикаций:

- [1] Guth A. H. // *Phys. Rev. D.* 1981. Vol. 23. P. 347–356.
- [2] Linde A. D. // *Phys. Lett. B.* 1982. Vol. 108. P. 389–393.
- [3] Frolovsky D., Ketov S. V., Saburov S. // *Front. Phys.* 2022. Vol. 10. P. 1005333.
- [4] Frolovsky D., Ketov S. V. // *Universe.* 2023. Vol. 6. P. 294.
- [5] Mukhanov V.F. // *JETP Lett.* 1985. Vol. 41. P. 493–496.
- [6] Sasaki M. // *Prog. Theor. Phys.* 1986. Vol. 76. P. 1036.
- [7] Planck Collaboration, Akrami Y. et al. // *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 641. P. A10.

## Угол отклонения света черными дырами из теории струн с T-дуальностью в слабом гравитационном поле

*Харипова Диана Ильдаровна*

*Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы*

*Каримов Рамис Хамитович*

*[kharipova.dream9@gmail.com](mailto:kharipova.dream9@gmail.com)*

Гравитационное линзирование является одним из наиболее значимых открытий в области физики. Под гравитационным линзированием принято понимать явление искривления света, под воздействием гравитации массивных и сверхмассивных компактных астрофизических объектов [1]. Для линзирования необходимо наличие трех компонентов: наблюдатель, линза и источник света. В зависимости от типа и расположения линзы наблюдатель может видеть искаженное изображение источника света, то есть изображение может быть ярче (тусклее), больше (меньше) по размерам и др. Линзирование может привести к наблюдению не одного изображения источника света, а двух или нескольких. Таким образом, гравитационное линзирование является хорошим инструментом для исследования типа линзы. В работе в качестве линзы рассматриваются два типа объекта: черная дыра из теории струн с T-дуальностью, описываемая массой  $M$ , зарядом  $Q$  и минимальной длиной или нулевой точкой пространства-времени  $\ell_0$ ; и черная дыра Бардина из общей теории относительности, описываемая только массой  $M$  и зарядом  $Q$ . Для этих объектов был рассчитан угол отклонения в слабом гравитационном поле методом Китона-Петерса и получена их разница, которая имеет вид:

$$\Delta\alpha = \alpha^{\text{T-duality}} - \alpha^{\text{Bardeen}} = \frac{3\pi Q^2}{8\ell_0 M} \left(\frac{M}{r}\right) + \frac{3\pi Q^2(45\pi^2 Q^2 + 960\pi\ell_0 M - 1024\ell_0^2)}{4096\ell_0^2 M^2} \left(\frac{M}{r}\right)^2 + \quad (1)$$

Из уравнения (1) видно, что заряд  $Q$  и минимальная длина T-дуальности  $\ell_0$  появляются в первом порядке угла отклонения. Параметр  $\ell_0$  обратно пропорционален углу отклонения, а  $Q$  прямо пропорционален. Это значит, что увеличение параметра  $\ell_0$  приводит к уменьшению угла отклонения. С ростом заряда  $Q$  угол отклонения увеличивается.

Список публикаций:

[1] *Hartle J.B. Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity / Ed. By Pearson Inc. San Francisco, 2013. 553 p.*

## Численное исследование темпа деформации капли топлива в процессе её разрушения

*Шебелева Анна Андреевна*

*Шебелев Александр Валерьевич*

*Сибирский федеральный университет*

*[An\\_riv@mail.ru](mailto:An_riv@mail.ru)*

В настоящее время существует проблема энергоэффективного использования ресурсов, в том числе в области технологий, использующих топливо. Для увеличения энергетической и экологической эффективности требуется большая поверхность химического реагирования в зоне теплообмена, что позволит интенсифицировать процесс прогрева и испарения капель жидких топлив, тем самым повысив полноту его выгорания. Для этого применяются форсуночные устройства, позволяющие впрыскивать топлива с малыми размерами капель в камеру сгорания. Использование распылительных устройств может вызвать унос капель из области теплообмена, вторичное же измельчение капель может решить данную проблему. Вторичный распад капель однородных жидкостей происходит при воздействии на нее аэродинамической силы превышающей силы поверхностного натяжения. Количественно, соотношение этих сил определяется величиной критерия деформации - числом Вебера, в данной работе  $We = 1081$ . Вторичное разрушение капель жидкостей встречается не только в камерах сгорания, но и при распылении топлив в топках котлов, в системах охлаждения, в двигателях внутреннего сгорания. Поэтому численное моделирование вторичного разрушения капель и исследование темпа поперечной деформации капли в процессе разрушения, является актуальной задачей.

В данной работе представлены результаты численного исследования разрушения вязкой капли топлива «естественного размера» под действием воздушного потока со скоростью  $u_g = 78.3$  м/с. Численное моделирование было проведено с помощью пакета программ Ansys Fluent, в рамках которого для разрешения межфазной границы использовался VOF метод. Для описания турбулентных потоков применялась LES модель, использование технологии адаптированных к границе подвижных сеток позволило разрешать вторичные капли до 20 мкм. Предложенная методика позволяет правильно описать поведение подвижной границы и основных турбулентных масштабов, которые участвуют в разрушении капли. Подробное описание численной методики

расчета разрушения капель, а также ее верификация представлены в работе [1]. Задача решалась в следующей постановке: расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами  $0.3 \times 0.3 \times 0.5$  м. В качестве граничных условий на одной из граней задавалось условие входа с фиксированным значением скорости воздушного потока, на остальных гранях расчетной области ставились условия свободного выхода. В начальный момент времени в расчетную область помещалась сферическая капля топлива диаметром  $d_0 = 0.0028$  м. В расчетах использовались следующие физические свойства: дизтопливо при температуре  $t = -45$  °C:  $\rho_l = 846$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_l = 0.428$  Па·с, воздух:  $\rho_g = 1.7$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_g = 1.789 \cdot 10^{-5}$  Па·с. Коэффициент поверхностного натяжения принимался равным  $\sigma = 0.027$  Н/м.

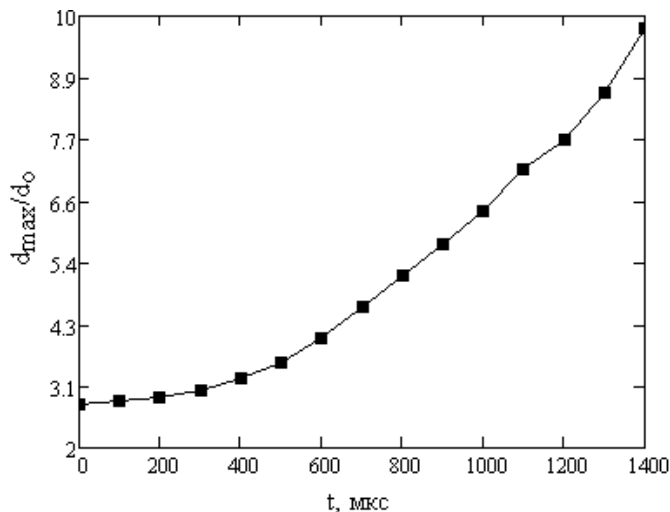


рис.1. Темп поперечной деформации капли дизтоплива

На рис.1 представлена зависимость безразмерного диаметра капли от времени, где  $d_{max}$  – это максимальный размер миделя капли в процессе разрушения. Время пребывания капли в потоке составляет 1400 мкс. Отношение максимального диаметра деформированной капли к начальному, к моменту начала массоуноса достигает величины  $d_{max}/d_0 = 2.6$ , время индукции разрушения капли составляет 1135 мкс. Данный режим разрушения характеризуется тем, что на начальном этапе развивается сценарий, похожий на парашютный режим, изначально сферическая капля превращается в жидкий диск  $\approx 500$  мкс, из которого выдувается тонкая пленка в направлении потока. В момент времени 1139  $\mu$ s наблюдается разрушение поверхности донной части капли, которое постепенно увеличивается в размере и капля дробится на мелкие фрагменты. Жидкое кольцо движется по потоку, постепенно истончаясь, и разрушается в последнюю очередь.

Исследование осуществлено при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта «Исследование особенностей вторичного дробления капель органоводоугольного топлива с целью совершенствования технологий его сжигания в арктических условиях» № 20231113-06407.

Список публикаций:

[1] Poplavski S.V., Minakov A.V., Shebeleva A.A., Boyko V.M. // *International journal of multiphase flow*. 2020. Vol. 127. Art. 103273.

## Исследование приливных сил в пространстве-времени фантомной кротовой норы

Лобо-Персей-Риази

Юсунова Розалия Мансуровна<sup>1</sup>

Хидиров Умурзок Кобилджонович<sup>1</sup>

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы

[yu.rose@mail.ru](mailto:yu.rose@mail.ru)

Приливные силы являются эффектом гравитационного поля. Именно эти силы отвечают за приливы и отливы на Земле, образование колец вокруг небесных объектов, разрушение тел в пределах полости Роша. Источником гравитационного поля могут быть и массивные астрофизические объекты, такие как нейтронные звезды, черные дыры, кротовые норы и т.д.

В работе исследуются приливные силы методом Горовица и Росса [1] вблизи горловины кротовой норы Лобо-Персей-Риази (ЛПР) [2]:



$$ds^2 = - \left[ 1 + \frac{\lambda r_0}{r} \right]^{1-\frac{1}{\lambda}} dt^2 + \frac{dr^2}{1-\frac{r_0}{r} \left( \frac{\lambda r_0}{r} + 1 - \lambda \right)} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2), \quad (1)$$

где  $r_0$  – радиус горловины и  $\lambda$  – параметр, связанный с уравнением состояния, который ограничен в диапазоне  $-1 < \lambda < 0$ .

Кривизна пространства-времени характеризуется компонентами тензора Римана в ортонормированной системе. Из всех ненулевых компонентов тензора кривизны были взяты три –  $R_{\hat{1}\hat{0}\hat{1}\hat{0}}$ ,  $R_{\hat{2}\hat{0}\hat{2}\hat{0}}$ ,  $R_{\hat{3}\hat{0}\hat{3}\hat{0}}$ :

$$R_{\hat{1}\hat{0}\hat{1}\hat{0}} = - \left( 1 - \frac{b}{r} \right) * \left( -\Phi'' + \frac{b'r-b}{2r(r-b)} \Phi' - (\Phi')^2 \right), \quad (2)$$

$$R_{\hat{2}\hat{0}\hat{2}\hat{0}} = R_{\hat{3}\hat{0}\hat{3}\hat{0}} = \frac{\gamma^2}{2r^2} \left[ \left( \frac{v}{c} \right)^2 \left( b' - \frac{b}{r} \right) + 2(r-b)\Phi' \right], \quad (3)$$

где  $\Phi$  – функция красного смещения,  $\Phi'$ ,  $\Phi''$  – первая и вторая производные функции красного смещения, соответственно,  $b$  – функция формы,  $b'$  – производная функции формы,  $\gamma$  – приливное ускорение,  $v$  – мгновенная скорость,  $c$  – скорость света.

Анализируя полученные выражения, можно сделать вывод о влиянии ненулевых приливных сил на пробную частицу.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00391).*

Список публикаций:

- [1] F.S.N. Lobo. *New asymptotically flat phantom wormhole solutions* / Francisco S. N. Lobo, Foad Parsaei, Nematollah Riazi // *Physical Review D*. – 2013. V. 87. – P.084030.  
 [2] Horowitz G.T., Ross S.F. *Naked black holes* // *Phys. Rev. D*. 1997. V. 56. P. 2180–2187.

## 2 - Физика конденсированного состояния вещества

Астафьев Павел Андреевич, н.с.  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**СВЧ поглощение в модифицированных оксидом германия твердых растворах феррита висмута и феррониобата свинца**  
Резниченко Лариса Андреевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [astafev@sfedu.ru](mailto:astafev@sfedu.ru) стр. 48

Вопиловский Алексей Михайлович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Кинетика затухания люминесценции и светоиндуцированного поглощения кристалла ниобата лития, легированного магнием**  
Федоренко Станислав Григорьевич,  
e-mail: [a.vopilovskii@g.nsu.ru](mailto:a.vopilovskii@g.nsu.ru) стр. 49

Гавриляк Алина Маратовна, аспирант 3 года обучения  
Челябинск, Южно-Уральский государственный университет, Институт естественных и точных наук  
**Влияние концентрации ионов на электрооптический отклик нематического жидкого кристалла**  
Подгорнов Федор Валерьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [alinaishmurzina1609@gmail.com](mailto:alinaishmurzina1609@gmail.com) стр. 51

Гвоздикова Екатерина Викторовна, 3 курс  
Кемерово, Кемеровский государственный университет, Институт фундаментальных наук  
**Структура и оптические спектры NLO активного кристалла  $\text{Ba}_2\text{NO}_3(\text{OH})_3$**   
Журавлёв Юрий Николаевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [ekaterinagvozdikova3@yandex.ru](mailto:ekaterinagvozdikova3@yandex.ru) стр. 52

Глазунова Екатерина Викторовна, н.с.  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Фазообразование и физико-химические свойства твердых растворов многокомпонентных систем на основе  $\text{BiFeO}_3$**   
Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [kate93g@mail.ru](mailto:kate93g@mail.ru) стр. 54

Гусейнова Айтэн Физулиевна, 5 курс  
Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, Физико-технический факультет  
**Антимикробные нанокompозитные покрытия на основе анодированной алюминиевой проволоки**  
Кокатев Александр Николаевич, к.т.н.  
e-mail: [avtenguseynova@mail.ru](mailto:avtenguseynova@mail.ru) стр. 55

Джантемиров Ауес Хасамбиевич, аспирант 3 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Моделирование температурной зависимости коэффициента Холла в системах с сильным электрон-фононным взаимодействием и высокой плотностью носителей заряда**  
Мясникова Анна Эдуардовна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [dzhantemirov.27@yandex.ru](mailto:dzhantemirov.27@yandex.ru) стр. 56

Дмитриев Виктор Олегович, аспирант 4 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический  
**Изучение механизмов взаимодействия  $\text{MeOx}$  ( $\text{Me}=\text{Cu}, \text{Ni}$ ) с графеновой плоскостью методом XANES спектроскопии**  
Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [vdmitriev@sfedu.ru](mailto:vdmitriev@sfedu.ru) стр. 58

Зубрилин Александр Александрович, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**О возможностях возникновения новых мультиферроидных состояний в твердых растворах на основе феррита висмута**  
Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [czybrilin15@gmail.com](mailto:czybrilin15@gmail.com) стр. 58

Коробко Кирилл Вячеславович, аспирант 1 года обучения  
Кемерово, Кемеровский государственный университет, Институт фундаментальных наук  
**Вычисление сингулярных интегралов по зоне Бриллюэна**  
Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [kirillir99@mail.ru](mailto:kirillir99@mail.ru) стр. 60

Кочкин Андрей Сергеевич, аспирант 2 года обучения, преподаватель  
Барнаул, Алтайский государственный технический университет, факультет специальных технологий  
**Молекулярный анализ кристалла Pt<sub>2</sub>Al**  
Старостенков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [andre211@mail.ru](mailto:andre211@mail.ru) стр. 61

Максименкова Мария Андреевна, 11 класс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, специализированный учебно-научный центр  
**Влияние примеси оксида циркония на процессы спекания на примере твёрдых растворов титаната-цирконата бария**  
Волков Дмитрий Вячеславович  
e-mail: [m44820379@gmail.com](mailto:m44820379@gmail.com) стр. 62

Мартыненко Александр Александрович, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства высокотемпературных сегнетоэлектрических твердых растворов системы (1-x)BiScO<sub>3</sub>-xPbTiO<sub>3</sub>**  
Павелко Алексей Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [alekmar@sfedu.ru](mailto:alekmar@sfedu.ru) стр. 63

Мойса Максим Олегович, н.с.  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики  
**Магнитоёмкость в твёрдых растворах (1-x)(Na<sub>0.5</sub>K<sub>0.5</sub>)NbO<sub>3</sub>-xBiFeO<sub>3</sub> при 77 К**  
e-mail: [moysa@sfedu.ru](mailto:moysa@sfedu.ru) стр. 64

Мукминова Регина Рустамовна, 4курс  
Уфа, Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Институт физики, математики, цифровых и нанотехнологий  
**Изучение оптического спектра поглощения полидифениленфталата допированного углеродными наноматериалами**  
Каримов Рамис Хамитович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [mukminova.regina.01@mail.ru](mailto:mukminova.regina.01@mail.ru) стр. 65

Недоедкова Ольга Вадимовна, аспирант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Исследование электрофизических свойств и электронной структуры композитных материалов на основе полианилина**  
Яловега Галина Эдуардовна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [nedoedkova@sfedu.ru](mailto:nedoedkova@sfedu.ru) стр. 66

Носова Наталья Максимовна, м.н.с.  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физический факультет  
**Влияние условий синтеза и термических обработок на свойства соединений Fe<sub>0.25</sub>TaCh<sub>2</sub> (Ch = S, Se)**  
Баранов Николай Викторович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [toporova.natalia@urfu.ru](mailto:toporova.natalia@urfu.ru) стр. 67

Пикуль Анастасия Денисовна, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Исследование высокоэнтропийных редкоземельных ортоферритов методом мессбауэровской спектроскопии**  
Кубрин Станислав Петрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [nasta.pikul.34@gmail.com](mailto:nasta.pikul.34@gmail.com) стр. 68

Подшивалов Алексей Павлович, магистрант 1 года обучения  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физико-технологический институт  
**Исследование магнитокристаллической анизотропии в металлических системах при помощи функций Грина с пространственным разрешением**  
e-mail: [a.p.podshivalov@urfu.ru](mailto:a.p.podshivalov@urfu.ru) стр. 69

Самигуллина Анжела Ильгизовна, 4 курс  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт  
**Спектр спиновых волн в двухслойной структуре решеток скирмионов**  
Шарафуллин Ильдус Фанисович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [angelasamig2002@gmail.com](mailto:angelasamig2002@gmail.com) стр. 70

Соловова Надежда Юрьевна, магистрант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический факультет  
**Кристаллическая и электронная структура плёнок (2?3x3)Bi/InAs**  
Голяшов Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [n.solovova@g.nsu.ru](mailto:n.solovova@g.nsu.ru) стр. 71

Тимофеев Вячеслав Сергеевич, аспирант 2 года обучения  
Кемерово, Кемеровский государственный университет, институт фундаментальных наук  
**Структура и зонный спектр кристалла Ca<sub>2</sub>NF с решеткой антихалькопирита**  
Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [slava.timofeev.mail@gmail.com](mailto:slava.timofeev.mail@gmail.com) стр. 72

Хилько Николай Георгиевич, 1  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики  
**Динамические эффекты радужного рассеяния атомов на поверхности кристалла**  
Малышевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [khilko@sfedu.ru](mailto:khilko@sfedu.ru) стр. 73

Шишлов Иван Владимирович, 1 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Особенности атомной и электронной структуры композита Co/PAN**  
Шматко Валентина Анатольевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [timi.win1408@gmail.com](mailto:timi.win1408@gmail.com) стр. 74

## **СВЧ поглощение в модифицированных оксидом германия твердых растворах феррита висмута и феррониобата свинца**

*Астафьев Павел Андреевич*

*Жидель Карина Михайловна*

*Южный федеральный университет*

*Резниченко Лариса Андреевна, д.ф.-м.н.*

*[Astafev@sfedu.ru](mailto:Astafev@sfedu.ru)*

В последнее время все больше внимания уделяется исследованию перспектив применения функциональных материалов, таких как сегнетоэлектрики, ферромагнетики и мультиферроики в области СВЧ-электроники в качестве радиопоглощающих материалов (РПМ). Проводится множество исследований электрических и магнитных свойств керамики на основе  $\text{BiFeO}_3$  (BFO) в СВЧ-диапазоне. В ряде работ [1–3] исследуются свойства BFO, модифицированного переходными металлами и редкоземельными элементами, который демонстрирует высокий уровень СВЧ поглощения в области частот 10–10.5 ГГц. Наряду с BFO, перспективным материалом для применения в СВЧ-электронике является  $\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  (PFN) [4]. Сообщается об удовлетворительных радиопоглощающих свойствах данного материала [5] и исследуются свойства твердых растворов (ТР) PFN с  $\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$  и  $\text{CuMnFeO}_4$ , которые также рассматриваются в качестве перспективных РПМ [6,7]. Существует два подхода для улучшения поглощающих свойств материала: 1) создание композитов на основе данного материала; 2) модификация исходного состава легирующими компонентами или другими составами схожей структуры. Для достижения высоких показателей поглощения в рамках настоящей работы был выбран второй подход. Таким образом, целью настоящей работы было установление закономерностей формирования СВЧ-отклика керамических материалов на основе BFO и PFN, модифицированных  $\text{GeO}_2$ , в зависимости от количества модификатора в системах, приближенных к реальным СВЧ устройствам.

Для проведения настоящего исследования были выбраны составы системы BFO–PFN в окрестностях концентрационных фазовых переходов, содержащих структурные неустойчивости (0.7BFO–0.3PFN — окрестности концентрационной области с содержанием ромбоэдрической и моноклинной фазы, 0.05BFO–0.95PFN — окрестности перехода из псевдокубической фазы в ромбоэдрическую). Образцы были выполнены в виде цилиндров высотой 1 мм и диаметром 12 мм с погрешностью по высоте не более 5%. Радиофизические измерения выполнялись с помощью векторного анализатора цепей (VNA) P9375A «Keysight» (USA, California), имеющего рабочий диапазон частот 300 кГц–26.5 ГГц, и измерительной ячейки, представляющей собой прямолинейный отрезок микрополосковой линии (МПЛ) на подложке из эпоксидного материала, армированного стекловолокном (FR4) с коаксиальными разъемами стандарта SMA 3.5 мм с обоих концов.

Результаты измерения и расчетов показывают (*рис. 1*), что при введении малого количества модификатора (0.5, 1 мас.%  $\text{GeO}_2$ ) в ТР 0.7BFO–0.3PFN зависимости коэффициента рассеяния от частоты изменяются незначительно, что говорит о возможности улучшения технологичности исходных составов при сохранении целевых параметров. При добавлении 0.5 мас.%  $\text{GeO}_2$  наблюдается незначительное расширение полосы поглощения, что может быть учтено при разработке высокоэффективных радиопоглощающих материалов. В составах 0.05BFO–0.95PFN, обладающих наиболее широкой полосой поглощения, при добавлении 0.5 мас.%  $\text{GeO}_2$  обнаружено как увеличение максимального значения потерь, так и расширения полосы с высокими потерями, причем материалы с наибольшей температурой спекания обладают наиболее широкой полосой поглощения. В сравнении с промышленным поглотителем на основе карбонильного железа и эпоксидной смолы с массовой долей карбонильного железа 60% образцы состава 0.7BFO–0.3PFN обладают схожим максимальным значением потерь, а образцы состава 0.05BFO–0.95PFN — схожей шириной полосы поглощения.

Указанное открывает перспективы применения составов, представленных в настоящей работе, в качестве материалов радиопоглощающих покрытий. Следует отметить, что исследованные материалы представляли собой керамику с высокой относительной плотностью, в отличие от промышленных поглотителей, представляющих собой композиты с относительно низким содержанием радиопоглощающего компонента. Для уточнения полученных результатов следует провести исследование композитов с аналогичным содержанием основного компонента.

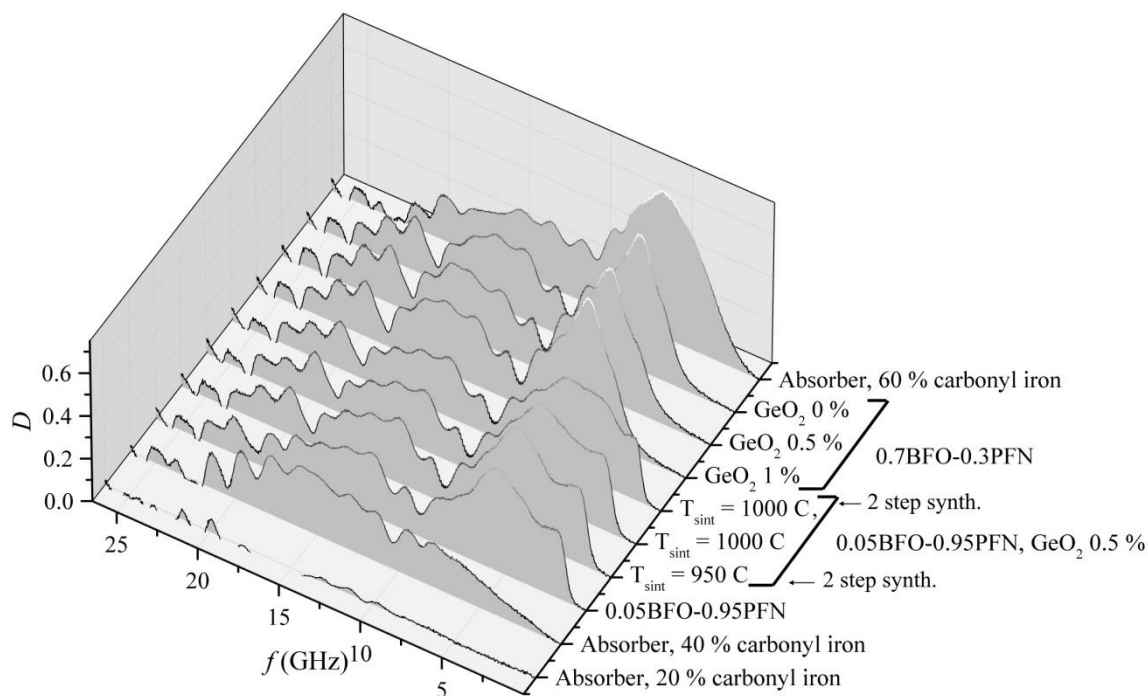


рис.1. Зависимости коэффициента рассеяния от частоты образцов BFO–PFN в сравнении друг с другом и промышленными поглотителями на основе карбонильного железа.

Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ). Наименование темы: «Мультикомпонентные интеллектуальные структуры: фазопереходные кроссинг-эффекты и стратегии ускоренного дизайна эко-систем для технологий цифрового проектирования устройств контроля параметров физических сред».

Список публикаций:

- [1] Palaimiene E., Macutkevicius J., Karpinsky D. et al. // *Applied Physics Letters*. 2015. V. 106. P. № 1.
- [2] Yousaf M., Lu Y., Hu E. et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022. V. 608. P. 1868.
- [3] Li Y., Cao W., Yuan J. et al. // *Journal of Materials Chemistry C*. 2015. V. 3. № 36. P. 9276.
- [4] Alvarez G., Font R., Portelles J. et al. // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2007. V. 68. № 7. P. 1436.
- [5] Khuchua N. // *Proceedings of the International Meeting on Ferroelectrics*. 1966. V. 2. P. 161.
- [6] Shevchuk Y., Gagulin V., Korzhagina S., Ivanova V. // *Inorganic materials*. 2001. V. 37. P. 836.
- [7] Fediy A.A., Kalganov D.A., Filonenko E.M. et al. // *Physics of the solid state*. 2021. V. 63. № 11. P. 1774.

## Кинетика затухания люминесценции и светоиндуцированного поглощения кристалла ниобата лития, легированного магнием

Вопиловский Алексей Михайлович

Новосибирский государственный университет

Федоренко Станислав Григорьевич

[a.vopilovskii@g.nsu.ru](mailto:a.vopilovskii@g.nsu.ru)

Ниобат лития является сегнетоэлектрическим оксидом, широко применяемым при создании электрооптических, а также нелинейно-оптических устройств [1], [2]. Этот кристалл также рассматривается в качестве эталона для других сегнетоэлектрических оксидов и обычно используется в качестве пробного материала, где новые концепции и приложения могут быть протестированы как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях [3]. Его уникальные электрические и оптические свойства, в том числе, обусловлены наличием межзонных состояний – поляронов малого радиуса. В частности, он является перспективным материалом для создания оптических ячеек памяти и оптических модуляторов, эффективность которых во многом определяется подвижностью поляронов и их прыжковыми барьерами. В связи с появлением относительно новых экспериментальных данных стал возможным более детальный анализ процессов,

происходящих в кристалле в результате возбуждения лазерным импульсом с целью определения этих параметров. До сих пор кинетические кривые люминесценции и фотоиндуцированного поглощения описывались лишь феноменологически, поэтому создание кинетической модели и определение на ее основе микроскопических параметров системы является актуальной задачей.

В настоящей работе был проанализирован обширный массив экспериментальных кинетических данных, измеренных в диапазоне температур 50-293 К [4, 5]. На основании анализа были предложены модельные механизмы люминесценции и светоиндуцированного поглощения, в которых основную роль играют взаимопревращения трех видов квазичастиц: электронных и дырочных поляронов, и самозахваченных экситонов.

Для люминесценции был рассмотрен механизм (1), согласно которому самозахваченные экситоны (E) могут аннигилировать с излучением фотона с характерным временем ( $\tau$ ) и параллельно захватываться на ловушках - вакансиях лития (Tv), переходя в состояние (Ep), в котором рекомбинация уже происходит безызлучательно; при этом захват происходит с обменной вероятностью в единицу времени (2).



$$w(T, r_{AB}) = w_T(T) \exp\left(-\frac{2r_{AB}}{l}\right) \quad (2)$$

где  $k(t)$  – нестационарная константа скорости тушения. Для поглощения на длине волны, соответствующей свободным электронным поляроном (F) предложен следующий механизм: после индуцирующего лазерного импульса в силу электронейтральности образуется одинаковое количество электронных и дырочных поляронов, дырочные поляроны быстро переходят в связанные состояния с малой подвижностью (позиции кислорода вблизи вакансий лития - To), на которых электронные поляроны (F) в дальнейшем тушатся по реакции (3) тоже с обменной вероятностью (2).



При этом для описания эксперимента предполагается, что при низких температурах тушение происходит с нестационарной константой скорости, а при высоких выходит на стационар. Расчёт обеих констант производился в приближении дифференциальной теории встреч. Определяющий кинетику интеграл от константы скорости при этом равен (4) для начальной нестационарной стадии, и (5) для выхода на стационар.

$$\int_0^t k(t') dt' = \int_R^\infty (1 - \exp(-w(r)t)) d^3r + \frac{Dt^3}{6} \int_R^\infty \left(\frac{dw(r)}{dr}\right)^2 \exp(-w(r)t) d^3r \quad (4)$$

$$\int_0^t k(t') dt' = 4\pi DR_0 t + 8\sqrt{\pi Dt} R_0^2 \quad (5)$$

Здесь D-парный коэффициент диффузии, R-максимальный радиус сближения,  $R_Q(w_T, l, D, R)$  - характерный радиус захвата, на котором происходит туннелирование при выходе на стационар. Экспериментальные данные были аппроксимированы рассчитанными теоретическими зависимостями методом постадийного анализа, в результате чего были определены и проанализированы прыжковые радиусы взаимодействия и энергии активации процессов, приводящих к релаксации поляронов и экситонов в кристалле, а также коэффициенты диффузии этих квазичастиц.

Список публикаций:

- [1] Zhang M. et al. *Integrated lithium niobate electro-optic modulators: when performance meets scalability* // *Optica*. 2021. V. 8. №. 5. p. 652–667.
- [2] Li Y. et al. *Recent progress of second harmonic generation based on thin film lithium niobate* // *Chinese Optics Letters*. 2021. V. 19. №. 6. p. 060012.
- [3] Reichenbach P. et al. *Polaron-mediated luminescence in lithium niobate and lithium tantalate and its domain contrast* // *Crystals*. 2018. V. 8. №. 5. p. 214.
- [4] Messerschmidt S. et al. *The role of self-trapped excitons in polaronic recombination processes in lithium niobate* // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2018. V. 31. №. 6. p. 065701.
- [5] Krampf A., Messerschmidt S., Imlau M. *Superposed picosecond luminescence kinetics in lithium niobate revealed by means of broadband fs-fluorescence upconversion spectroscopy* // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. №. 1. p. 11397.

## Влияние концентрации ионов на электрооптический отклик нематического жидкого кристалла

**Гавриляк Алина Маратовна**

*Гавриляк Максим Витальевич*

*Южно-Уральский государственный университет*

*Подгорнов Федор Валерьевич, к.ф.-м.н.*

*AlinaIshmurzina1609@gmail.com*

Электрооптический отклик жидкокристаллической (ЖК) ячейки играет важную роль в создании оптических устройств, таких как электрооптические модуляторы света, дисплеи и т.д. При создании ЖК-устройств необходимо учитывать параметры, влияющие на пространственно-временную модуляцию света, прошедшего сквозь ЖК-ячейку. Моделирование электрооптического отклика позволяет оптимизировать параметры ЖК-ячейки для увеличения скорости переключения, уменьшения порогового напряжения и т.д. Одним из важных параметров, который необходимо учесть при моделировании, является концентрация ионов в ячейке. Из-за присутствия ионных примесей в объеме жидкого кристалла происходит перераспределение электрического поля внутри ячейки, что приводит к изменению параметров электрооптического отклика. Целью данной работы является моделирование электрооптического отклика нематического жидкого кристалла с учетом наличия примесных ионов.

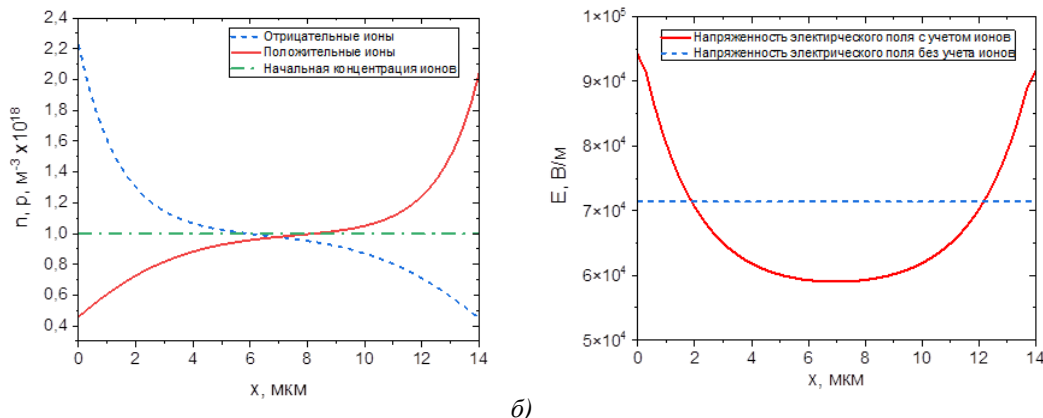
Способность молекул жидких кристаллов переориентироваться под действием внешнего электрического поля дает возможность пространственно-временной модуляции света, прошедшего через ЖК-ячейку посредством изменения его поляризации. Электрооптический отклик света, прошедшего через ЖК-ячейку, рассчитывался по следующей формуле:

$$I = I_0 \left( \sin^2(2\alpha) \sin^2 \left( \frac{\Gamma}{2} \right) \right), \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света,  $\alpha$  – угол между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора ЖК,  $\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l (n_e(\theta) - n_o)$  фазовый сдвиг ( $\lambda$  – длина волны света,  $\Delta l$  – толщина моделируемого слоя,  $n_o$  – показатель преломления света для обыкновенного луча,  $n_e(\theta)$  – показатель преломления света для необыкновенного луча, который зависит от угла наклона молекул данного слоя  $\theta(z)$ .  $n_e(\theta)$  рассчитывается по следующей формуле:

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2(\theta(z)) + n_o^2 \sin^2(\theta(z))}} \quad (2)$$

Угол наклона молекул жидкого кристалла зависит от распределения электрического поля внутри ячейки. При приложении напряжения к ячейке ионы противоположных знаков смещаются к электродам, тем самым изменяя распределение концентрации разноименных ионов (рис. 1а). Пространственно-разделенные ионы противоположных знаков создают внутреннее электрическое напряжение не равное внешнему приложенному напряжению, тем самым оказывая влияние на динамику переключения молекул жидкого кристалла. Распределение электрического поля внутри ячейки с учетом и без учета ионов представлено на рис. 1б. Гидродинамические эффекты при моделировании во внимание не принимались.



a)

б)

рис.1. а) пространственное распределение концентрации ионов при приложении переменного электрического напряжения; б) пространственное распределение напряженности электрического поля в ЖК-ячейке с учетом и без учета ионов



На рис.2 представлены зависимости нормированной интенсивности света, прошедшего через ЖК-ячейку между двумя скрещенными поляризаторами, полученные в результате моделирования. Из графиков можно заметить, что вид электрооптического отклика зависит от поля внутри ячейки, создаваемого ионами, а также от концентрации. При увеличении концентрации ионов наблюдается исчезновение экстремума в начале цикла и на полупериоде по времени.

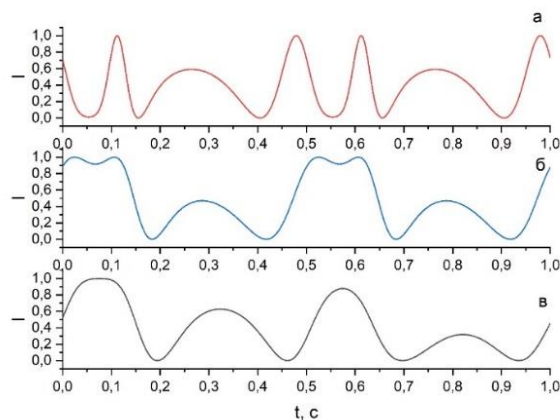


рис. 2. Электрооптический отклик НЖК в планарной ячейке а) для  $E(x)=const$  б) с учетом внутреннего поля, создаваемого ионами с концентрацией  $n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$  в) с концентрацией  $n = 10^{18} \text{ м}^{-3}$

Таким образом, было получено, что влияние концентрации ионов приводит к изменению динамики электрического переключения молекул ЖК. Это будет сказываться на форме электрооптического отклика. При моделировании электрооптического отклика жидких кристаллов необходимо учитывать перераспределение электрического поля, создаваемого ионами. Это позволяет оптимизировать параметры ЖК-ячейки с целью улучшения ее характеристик.

## Структура и оптические спектры NLO активного кристалла $\text{Ba}_2\text{NO}_3(\text{OH})_3$

*Гвоздикова Екатерина Викторовна*

*Кемеровский государственный университет*

*Журавлёв Юрий Николаевич, д.ф.-м.н.*

*[ekaterinagvozdikova3@yandex.ru](mailto:ekaterinagvozdikova3@yandex.ru)*

Разработка и использование нелинейно-оптических кристаллов (NLO) глубокого ультрафиолетового излучения (DUV), являющихся важными материалами для твердотельных лазеров, генерирующих когерентный свет с длиной волны  $\lambda=200$  нм посредством каскадного процесса преобразования частоты, оказали значительное влияние на различные области, начиная от фундаментальных научных исследований и заканчивая инженерными приложениями [1]. Одним из таких NLO кристаллов является  $\text{Ba}_2\text{NO}_3(\text{OH})_3$ , который был синтезирован с помощью модифицированной высокотемпературной твердофазной реакции с использованием  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  в качестве самотекучего вещества. Кристаллизуется в гексагональную кристаллическую систему с ацентрической пространственной группой симметрии  $P\bar{6}2m$  и имеет ширину запрещенной зоны 6.22 эВ. Полученный эффективный коэффициент NLO для  $\text{Ba}_2\text{NO}_3(\text{OH})_3$  составляет  $1.56 \text{ pmV}^{-1}$  [2]. В связи с тем, что экспериментальные исследования его оптических свойств отсутствуют, необходимо выполнить теоретический расчет.

В работе использовался метод компьютерного моделирования с применением теории Хартри – Фока (HF) и теории функционала плотности, который реализован в программном коде CRYSTAL [3]. Для расчетов выбраны наиболее распространенные градиентные и гибридные функционалы: PBE с дисперсионной добавкой D3(BJ), PBESOL0 и непараметрический PBE0, 3-х параметрический B3LYP, который сочетает в себе 20% HF обмен у с обменно-корреляционным функционалом B3. Точность процедуры самосогласования составила  $10^{-9}$  а.е.

В процессе оптимизации геометрии кристалла были получены следующие параметры: постоянные решетки  $a$  и  $c$ , объем  $V$  и расстояния между атомами. В элементарной ячейке содержится один неэквивалентный атом Ba, два неэквивалентных атома O1 и O2 с расстоянием 2.2089 Å, один неэквивалентный атом N и один неэквивалентный атом H. Длина связи N – O1 равна 1.2753 Å, а N – O2 0.985 Å. Расстояния

между атомами катиона Ва – O<sub>1</sub> равно 2.9740 Å и Ва – O<sub>2</sub> 2.7862 Å. Особенностью этих соединений является наличие двух функциональных групп: нитрогруппы NO<sub>3</sub> и гидроксид OH, которые и образуют два слоя. Установлено, что наименьшее среднеквадратичное отклонение результатов расчета от экспериментального значения [2] получено для PBE – D3 функционала и оно составило 3.1%.

Для исследования сложных кристаллических систем широко используется ИК спектроскопия и комбинационное рассеяние (КР) света.

В экспериментальном ИК-спектре Ва<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>(OH)<sub>3</sub> зафиксированы частоты на 619, 1384 и 3568 см<sup>-1</sup> [2], которым соответствуют теоретические значения 671.4, 1454.9 и 3769 см<sup>-1</sup>, полученные с ВЗЛР функционалом и 637.9, 1402.2, 3663 см<sup>-1</sup> с PBE-D3 функционалом. Таким образом теоретические значения получились завышенными относительно экспериментальных. Все активные в ИК и КР спектрах частоты приведены в таблице:

Неприводимые представления $P\bar{6}2m$	ИК		КР	
	ВЗЛР	PBE-D3	ВЗЛР	PBE-D3
E''	-	-	67.1	47.0
	-	-	219.3	234.3
	-	-	605.2	582.2
E'	111.9	118.9	111.9	118.9
	134.0	143.2	134.0	143.2
	230.2	241.2	230.2	241.2
	248.6	246.4	248.6	246.4
	671.4	637.9	671.4	637.9
	709.8	688.7	709.8	688.7
	1454.9	1402.2	1454.9	1402.2
	3769.9	3663.0	3769.9	3663.0
A''1	-	-	193.6	191.0
	-	-	1094.6	1058.8
	-	-	3772.3	3666.9
A''2	225.5	218.5	-	-
	385.9	327.3		
	849.8	777.6		

В гидроксиде 3 оптических колебания симметрии E' и A''<sub>1</sub>. В ИК мода E' имеет частоту 3769.9 см<sup>-1</sup> и низкую интенсивность. В КР колебательная мода A''<sub>1</sub> с числом 3772.3 см<sup>-1</sup>, наоборот, является самой интенсивной - 100%, против 33.2% для E'. Именно эта очень большая интенсивность объясняет скудность спектра КР, где выделяется полоса ν<sub>1</sub> при 1094.6 см<sup>-1</sup> и ν<sub>4</sub> при 709.8 см<sup>-1</sup>.

В ИК самой интенсивной модой является ν<sub>3</sub> (1980 км/моль, 100%) и мода симметрии A''<sub>2</sub> с волновым числом 385.9 см<sup>-1</sup>, которая образована z- колебаниями атомов гидроксида с подавляющим вкладом в фоновую плотность от водорода. Мода ν<sub>2</sub> той же симметрии имеет несравнимо меньшую интенсивность. Моды симметрии E', которые образуют три другие интенсивные в ИК полосы по мере убывания частоты, относятся к вращению гидроксидной группы, трансляции OH и NO<sub>3</sub> и вклад бария становится определяющим только для волнового числа 134.0 см<sup>-1</sup>.

Компьютерное моделирование структуры и колебательных спектров соответствует экспериментальным значениям, таким образом, эти методы могут использоваться для дальнейшего изучения свойств этих соединений.

Список публикаций:

- [1] Kumar S.C., Elavarasi C., Manikam S., and James, J.G. // *Recent Advances in Infrared Nonlinear Optical Crystal: Crystal Growth and Chirality - Technologies and Applications*. 2023.
- [2] Dong X., Huang L., Liu Q., Zeng H., Lin Z., Xu D., and Zou G. // *Chemical Communications*. 2018. v. 54. № 45. P. 5792-5795.
- [3] Dovesi R., Erba A., Orlando R., Zicovich-Wilson C. M., Civalleri B., Maschio L., Rerat M., Casassa S., Baima J., Salustro S., Kirtman B. // *WIREs Comput. Mol. Sci*. 2018. V. 8. P. e1360.

## Фазообразование и физико-химические свойства твердых растворов многокомпонентных систем на основе $\text{BiFeO}_3$

Глазунова Екатерина Викторовна

Лымарь Дмитрий Вячеславович, Чехова Анастасия Сергеевна

Зорин Денис Игоревич

Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета

Вербенко Илья Александрович

[kate93g@mail.ru](mailto:kate93g@mail.ru)

В настоящей работе исследуются бесвинцовые композиции на основе широко известных материалов, обладающих уникальными пиро-, пьезо-, электрооптическими коэффициентами и высокими диэлектрическими характеристиками -  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$  [1-2], а также самого известного сегнетомагнетика  $\text{BiFeO}_3$ , обладающего высокими температурами сегнетоэлектрического и магнитного переходов [3]. Сочетание указанных материалов в одной композиции может привести к формированию новых структур материалов и возникновению в них новых эффектов [4].

Объектами исследования стали твердые растворы (ТР) систем  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{LiNbO}_3$  и  $(1-x)(0.9\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.1\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3)-x\text{BiFeO}_3$  полученные методом двухстадийного твердофазного синтеза и спекания по обычной керамической технологии.

Структура образцов изучена методом порошковой дифракции на дифрактометре ДРОН-3 ( $\text{Co K}\alpha$  – излучение). Зависимости диэлектрических характеристик от температуры получали с помощью LCR-метра Agilent E4980A на специально сконструированном в НИИ физики автоматическом стенде с программным комплексом «Kalipso» в интервале температур (25–650) °С и частот 1кГц-1МГц.

По результатам рентгенофазового анализа ТР системы  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{LiNbO}_3$  было установлено формирование структуры типа пироклора в интервале  $0.4 \leq x \leq 0.6$ . При других концентрациях компонентов образуются композиты на основе  $\text{BiFeO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$  и пироклора). Применение механоактивации смещает равновесие реакции в сторону формирования пироклорной фазы.

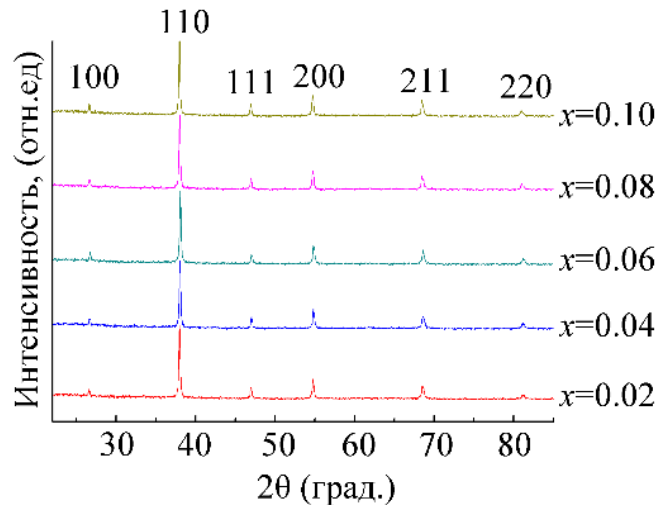


рис.1. Дифрактограммы ТР системы  $(1-x)(0.9\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.1\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3)-x\text{BiFeO}_3$

Исследования системы  $(1-x)(0.9\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.1\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3)-x\text{BiFeO}_3$  показали, что все ТР имеют кубическую структуру при комнатной температуре (рис.1). На зависимостях диэлектрической проницаемости от температуры наблюдаются широкие размытые по температуре и частоте максимумы, которые могут быть связаны с формированием в материале микро- и нано- областей различного состава из-за упорядочения катионов в А-позиции.

Более детальные обсуждения диэлектрических характеристик и пьезоэлектрических свойств ТР систем  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{LiNbO}_3$  и  $(1-x)(0.9\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3-0.1\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3)-x\text{BiFeO}_3$  будут представлены в докладе.

Выражаем благодарность за помощь в проведении рентгенографического эксперимента н.с. Шилкиной Л.А. и д.ф.м.н. Вербенко И.А. за помощь в обсуждении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/Г30110/23-11-ИФ на оборудовании ЦКП НИИ физики ЮФУ)

Список публикаций:

[1] Dai Y-J, et al. // *J. Am Ceram Soc.* 2010. 93. P. 1108–1113.

[2] Sosunov A.V., Volynstev A.B., Tsiberkin K.B., Yuriev V. A. & Ponomarev R.S. // *Ferroelectrics.* 2017. V. 506. № 1. P. 24-31.

[3] Silva J., Reyes A., Esparza H., Camacho H., Fuentes L. // *J. Integr. Ferroelectr.* 2011. 126. P. 47.

[4] Bharadwaj S.R., Varma S., Wani B.N. // *In book: Functional Materials.* 2012. PP.639-674.

## **Антимикробные нанокompозитные покрытия на основе анодированной алюминиевой проволоки**

**Гусейнова Айтен Физулиевна**

*Петрозаводский государственный университет*

*Кокатев Александр Николаевич, к.т.н.*

[aytenguseynova@mail.ru](mailto:aytenguseynova@mail.ru)

Серебросодержащие нанокompозитные покрытия (НКП) на основе пористых анодных оксидов алюминия (ПАОА) являются перспективным материалом для применения в качестве основы элементов солнечных батарей, люминесцентных (светоизлучающих) устройств, каталитически активных наноматериалов, а также антимикробных поверхностей. Анодирование алюминиевой проволоки перспективно для получения цилиндрических (3D) серебросодержащих НКП, что расширит область практического применения ПАОА. Например, для очистки воздуха и воды от патогенных бактерий, и вирусов, путем простой интеграции проволоки в водопроводы и воздухопроводы.

Целью данной работы являлось создание технологии формирования серебросодержащих нанокompозитных покрытий на алюминиевой проволоке. Анодирование образцов алюминиевой проволоки (А7Е) проводилось в 15%  $H_2SO_4$  и 3%  $C_2H_2O_4$  при  $j_a=20$   $mA/cm^2$  в течение 40 мин. Для ряда образцов полученных в 3%  $C_2H_2O_4$ , дополнительно проводилось утонение барьерного слоя оксида (ступенчатое уменьшение напряжения анодирования  $U_a$  от текущего значения до 1В со скоростью 200 мВ/с) и уширение пор (5%  $H_3PO_4$ ,  $T=35^\circ C$ , 15 мин). Осаждение наночастиц Ag в поры ПАОА проводилось с применением методики фотохимического синтеза (пропитка анодированных образцов в 0.1М  $AgNO_3$ , 30 мин с последующим облучением УФ,  $\lambda=325$  нм, 30 мин) и электрохимического осаждения (поляризация образцов переменным током при напряжении 20 В в течение 15 мин в растворе 1.51 г/л  $AgNO_3$  + 45 г/л  $H_3BO_3$ ).

Изучение морфологии поверхности образцов проводилось методом полуконтактной атомно-силовой микроскопии (АСМ) и цифровой оптической стереомикроскопии. Оценка коррозионной стойкости выполнялась путем выдержки образцов в коррозионной среде 10% NaCl + 1N  $CuSO_4$  в течение 30 мин при  $T = (18-20)^\circ C$  с последующим определением площади, занятой очагами коррозии. Антимикробная активность покрытий по отношению к воде из природных водоемов тестировалась с использованием бакпечаток HiTouch (серия FL015).

Изучение различных участков поверхности ПАОА методом АСМ показало, что гальваностатическое (ГСР) анодирование алюминиевой проволоки приводит к формированию ПАОА с открытыми неупорядоченными порами диаметром от 9 до 16 нм. На поверхности оксидов, сформированных в 3%  $C_2H_2O_4$ , присутствует тонкий дефектный слой, который частично закрывает основные поры, что характерно для непродолжительного процесса одноступенчатого ГСР анодирования алюминия в данном электролите. На основании измерения толщины ПАОА отделенных от алюминиевой подложки, установлено, что скорость роста оксида на алюминиевой проволоке при выбранных параметрах процесса составляет 16-17 мкм/ч.

Для получения серебросодержащих НКП применялась методика фотохимического синтеза наночастиц Ag в порах ПАОА. Последующее изучение поверхности модифицированных образцов методом АСМ позволило установить присутствие в межпоровом пространстве ПАОА отдельных наночастиц размером от 40 до 70 нм, предположительно  $Ag/Ag_2O$  (рис.1а). Для увеличения количества наночастиц Ag в порах оксида также применялась методика электрохимического осаждения (ЭХО). В ходе работы установлено, что применение ЭХО приводит к окрашиванию образцов в черный цвет. Менее интенсивное и однородное изменение цвета ПАОА наблюдалось для образцов алюминиевой проволоки, анодированных в 3%  $C_2H_2O_4$ , что может говорить об осаждении меньшего количества серебра в поры оксида. Данный факт можно объяснить большей толщиной барьерного слоя оксида, сформированного в 3%  $C_2H_2O_4$ . Для уменьшения толщины барьерного слоя оксида применялась методика утонения барьерного слоя и уширения пор. Методом АСМ показано, что уширение пор оксида приводит к частичному удалению дефектного слоя и увеличению среднего диаметра пор до 33 нм. По результатам измерения электрической емкости образцов установлено, что последовательное проведение процедуры утонения барьерного слоя и уширения пор способствует уменьшению толщины барьерного слоя оксида до 14 нм.

ЭХО модификация образцов наночастицами Ag показала, что утонение барьерного слоя и уширение пор приводит к более интенсивному и однородному окрашиванию образцов в черный цвет, что свидетельствует об осаждении большего количества наночастиц в порах оксида. Последующее АСМ изучение ПАОА показало, что применение ЭХО приводит к формированию наночастиц серебра размером от 15 до 30 нм, присутствующих не только в порах, но и в межпоровом пространстве, при этом поры оксида остаются открытыми (рис. 1б).

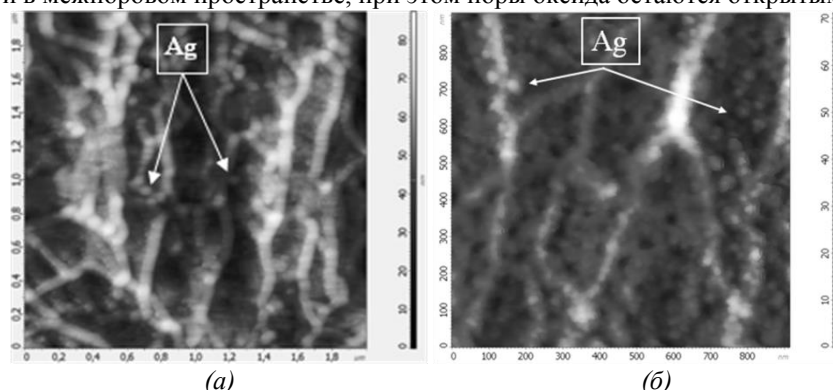


рис. 1. АСМ изображения пористого слоя ПАОА, сформированного в 3%  $C_2H_2O_4$ : после фотохимического осаждения 2-х слоев Ag – (а); после утонения барьерного слоя, уширения пор и ЭХО модификации Ag – (б).

Таким образом, была разработана технология получения методом ЭХО серебросодержащих нанокompозитных покрытий, которые в дальнейшем были проверены на коррозионную стойкость и антимикробную активность. В ходе испытаний было выявлено, что анодирование повышает коррозионную стойкость химически очищенных образцов, а осаждение серебра в поры ПАОА методом ЭХО не приводит к снижению защитных свойств, а наоборот способствует улучшению коррозионной стойкости разработанных нанокompозитных покрытий. На поверхности данных образцов очагов коррозии не обнаружено. Созданные серебросодержащие нанокompозитные материалы на основе ПАОА обладают высокой антимикробной активностью, определенной по уменьшению общего количества микроорганизмов в 1 м<sup>3</sup> исследуемой воды до 0.2 КОЕ/м<sup>3</sup>, по сравнению с контрольными образцами, содержащими порядка (3-5) КОЕ/м<sup>3</sup>. Такие покрытия могут использоваться в качестве защитных антимикробных поверхностей на различных алюминиевых изделиях и материалов для очистки воды от патогенных микроорганизмов.

## Моделирование температурной зависимости коэффициента Холла в системах с сильным электрон-фононным взаимодействием и высокой плотностью носителей заряда

*Джантемиров Ауес Хасамбиевич*  
*Мясникова Анна Эдуардовна*  
 Южный федеральный университет  
*Мясникова Анна Эдуардовна*  
[Dzhantemirov.27@yandex.ru](mailto:Dzhantemirov.27@yandex.ru)

Более 30 лет изучения высокотемпературных сверхпроводящих купратов и попыток построения теоретических моделей, способных объяснить наблюдаемые в экспериментах эффекты, приводят к заключению, что механизм высокотемпературной сверхпроводимости, вероятнее всего, не может быть объяснен за счет одних только электронных корреляций. С учётом этого интерес представляют модели, учитывающие роль сильного электрон-фононного взаимодействия в механизме сверхпроводимости. В недавней работе была построена фазовая диаграмма систем с сильным дальнедействующим электрон-фононным взаимодействием [1]. На полученной диаграмме существует область с двухжидкостной системой (автолокализованных и делокализованных) носителей заряда. Исходя из этого имеет смысл изучить влияние фазовых переходов в электронной подсистеме на транспортные свойства таких систем. Целью данной работы является моделирование температурной зависимости коэффициента Холла в системах с сильным электрон-фононным взаимодействием и высокой плотностью носителей заряда.

Для моделирования коэффициента Холла использована термодинамическая функция распределения, учитывающая возможность сосуществования автолокализованных и делокализованных состояний носителей заряда [2]. Концентрации носителей заряда в разных состояниях получены вариационным методом в результате минимизации свободной энергии системы с радиусом биполярона в качестве вариационного параметра [1,3]. Широко известно, что число Холла в купратах претерпевает скачкообразный рост с повышением температуры

[4]. При таком росте пропорциональность Холловской плотности носителей уровню допирования  $p$  сменяется на пропорциональность  $p+1$ . В данной работе изучается возможность того, что такой скачок возникает вследствие участия дырок из верхней половины нижней Хаббардовской зоны, причем мера их участия зависит от плотности делокализованных носителей из нижней половины зоны. Для исследования такого предположения из экспериментальных данных выделена доля  $D$  дырок из верхней половины зоны, участвующих в проводимости, как функция концентрации  $n_{deloc}$  делокализованных носителей. Для выделения функции  $D(n_{deloc})$  использованы экспериментальные данные при высоких температурах, при которых, согласно модели, автолокализованных состояний уже нет. Коэффициент Холла в таком случае может быть получен в виде:

$$R_H = \frac{1}{en_{eff}}, n_{eff} = n_l + D(n_{deloc})n_u, \quad (1)$$

где  $n_l$  и  $n_u$  – концентрации дырок в нижней и верхней половинах нижней Хаббардовской зоны, соответственно.

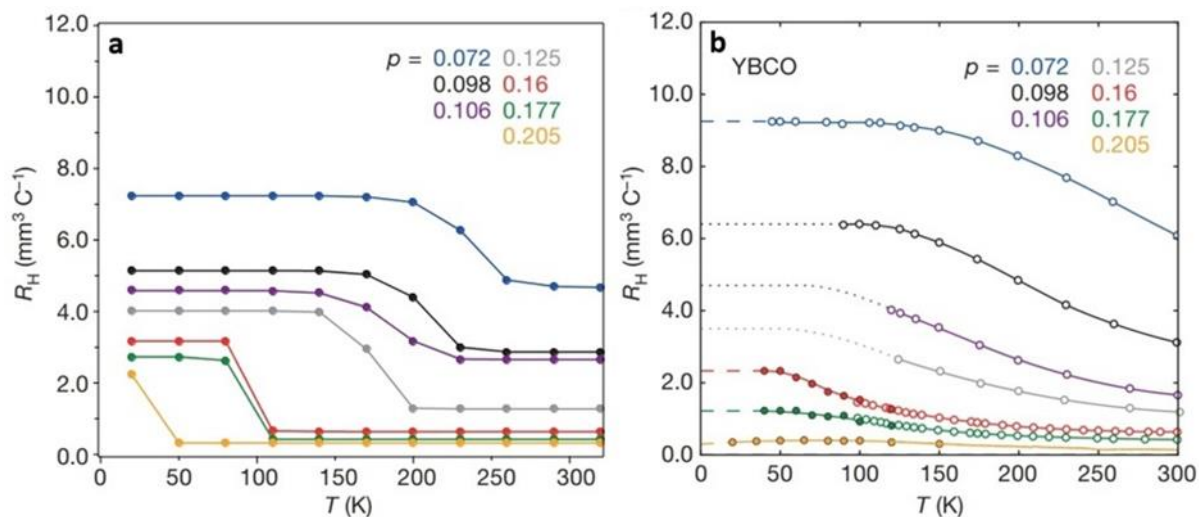


рис. 1. Сравнение результатов моделирования температурной зависимости коэффициента Холла с экспериментальными данными. а) Результаты моделирования. б) Экспериментальные данные, полученные на образцах  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  [4]

На рис. 1 представлены результаты моделирования температурной зависимости коэффициента Холла для разных уровней допирования и экспериментальные данные для образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Из сравнения низкотемпературной части графиков можно сделать вывод, что предположение о вовлечении дырок из верхней половины Хаббардовской зоны, степень которого зависит от концентрации делокализованных дырок, дает достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными. Вместе с тем метод размазки фазового перехода требует дальнейших исследований, т. к. он приводит к смещению температур фазового перехода. Дело в том, что температура фазового перехода определяется из условия равенства свободной энергии двухжидкостной системы носителей заряда и обычной Ферми-жидкости с тем же уровнем допирования. В таком случае плотность биполяронов изменяется скачкообразно. В то же время обычный характер распада автолокализованных состояний с ростом температуры имеет более плавный характер [2]. Поэтому мы использовали разность свободных энергий двухжидкостной системы и Ферми-жидкости для описания области вблизи фазового перехода. Однако, этот метод требует доработки из-за смещения температуры фазового перехода в результате его применения.

Список публикаций:

- [1] Myasnikova A. E., Doronkina S. V., Arutyunyan R. R., Dzhantemirov A. H // Preprint at <https://arxiv.org/abs/2401.04479> 2024
- [2] Myasnikova A. E., Myasnikov E. N., Moseykin D. V., Zuev I. S. // Phys. Lett. A 2015. 379. 458.
- [3] Myasnikova A. E., Nazdracheva T. F., Lutsenko A. V., Dmitriev A. V., Dzhantemirov A. H., Zhileeva E. A., Moseykin D. V. // J. Phys.: Condens. Matter 2019. 31. 235602.
- [4] Badoux S. et al // Nature 2016. 531. 210.

## **Изучение механизмов взаимодействия $\text{MeOx}$ ( $\text{Me}=\text{Cu}, \text{Ni}$ ) с графеновой плоскостью методом XANES спектроскопии**

*Дмитриев Виктор Олегович*

*Згерская Юлия Вячеславовна, Шматко Валентина Анатольевна, Яловега Галина Эдуардовна*

*Южный федеральный университет*

*Донской государственной технической университет*

*Яловега Галина Эдуардовна*

*[vdmित्रiev@sfnu.ru](mailto:vdmित्रiev@sfnu.ru)*

Композиты на основе оксидов переходных металлов и углеродных наноматериалов могут использоваться в качестве катализаторов, сенсоров, суперконденсаторов. Свойства композитов могут зависеть от взаимодействия атомов металла и углерода. Целью работы было исследование механизмов взаимодействия оксидов переходных металлов (Cu, Ni) с графеновой сеткой в нанокompозитах  $\text{MeOx}/\text{МУНТ}$ , методом ближней тонкой структуры рентгеновского поглощения. Были проанализированы экспериментальные результаты, построены различные структурные модели нанокompозитов  $\text{MeOx}/\text{УНТ}$  ( $\text{Me} = \text{Cu}, \text{Ni}$ ), для которых был выполнен расчёт спектров рентгеновского поглощения XANES (X - ray Absorption Near Edge Structure).

Анализ экспериментальных спектров рентгеновского поглощения за К-краем углерода, никеля и меди композитов  $\text{CuOx}/\text{УНТ}$  и  $\text{NiOx}/\text{УНТ}$  показал, что локальная структура окружения меди в композите соответствует  $\text{CuO}$ , а никеля -  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ .

Проведено моделирование возможных механизмов взаимодействия никеля и меди с графеновой сеткой и расчёт спектров рентгеновского поглощения за К-и  $L_{2,3}$ -краями меди и никеля. Теоретический анализ спектров XANES проводился с использованием программного комплекса FDMNES в полном потенциале, методом многократного рассеяния. Были построены различные структурные модели взаимодействия атомов меди и никеля, а также кластеров  $\text{CuO}$  и  $\text{NiO}$ , с графеновой плоскостью и для них рассчитаны теоретические спектры. Рассмотрены три возможных модели взаимодействия: атомный кластер со структурой  $\text{NiO}$  и  $\text{CuO}$  располагался над центром углеродного гексагона, над его вершиной и связью углерод-углерод. На основе согласия экспериментальных и теоретических спектров определены наиболее вероятные пути связывания оксидов никеля и меди с графеновой сеткой.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-22-00459 в Южном федеральном университете.

## **О возможностях возникновения новых мультиферроидных состояний в твердых растворах на основе феррита висмута**

*Зубрилин Александр Александрович*

*Глазунова Екатерина Викторовна*

*Южный федеральный университет*

*Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.*

*[czybrilin15@gmail.com](mailto:czybrilin15@gmail.com)*

Одной из наиболее интересных групп объектов физики твердого тела являются мультиферроики - среды, сочетающие упорядочения смещений электрических зарядов (сегнетоэлектрическое (СЭ) или антисегнетоэлектрическое (АСЭ)) и локальных намагниченностей в одном материале [1]. Взаимодействие электрических и магнитных полей в таких средах может носить необычный характер [2]. Так, возможно появление взаимосвязи между статическим магнитным состоянием и поляризацией, возникновение гигантских магнитоэлектрического (МЭ) и магнитодиелектрического эффектов. С точки зрения очередности возникновения, упорядоченного по двум параметрам состояния, мультиферроики принято делить на две большие группы: мультиферроики первого рода и второго рода. В мультиферроиках первого рода магнитная и СЭ система возникают независимо друг от друга при различных температурах (как правило, СЭ или АСЭ полярные состояния проявляются при более высокой температуре), и взаимодействие между ними крайне слабо выражено. Наиболее же интересными являются мультиферроики второго рода [2]. В них возникновение магнитного упорядочения предопределяет кристаллизацию СЭ поляризации при дальнейшем снижении температуры, и две подсистемы оказываются тесно связаны друг с другом, что и приводит к возникновению вышеуказанных эффектов. К сожалению, ассортимент сред, устроенных таким образом, крайне ограничен, и практически все они существуют в упорядоченном состоянии при температурах намного ниже комнатной.



Особое место в физике мультиферроиков принадлежит ферриту висмута ( $\text{BiFeO}_3$ ). Этот сложный оксид со структурой типа перовскита обладает рекордными температурами СЭ ( $T_c \sim 810^\circ\text{C}$ ) и антиферромагнитного ( $T_N \sim 370^\circ\text{C}$ ) упорядочений и несмотря на то, что относится к мультиферроикам первого рода, при определенных условиях способен проявлять свойства обусловленные линейной связью поляризации и намагниченности [3]. Причиной указанных эффектов является взаимодействие типа Дзялошинского-Мория, которое проявляется в случаях нарушения симметрии связи Fe-O и возникновения дополнительного вклада несоразмерной магнитной структуры в поляризацию. Такие нарушения могут быть следствием размерного эффекта (тонкие пленки), химического модифицирования, в том числе, с образованием вакансий, воздействия сверхвысоких давлений, магнитных и электрических полей. В ряде случаев возникновение фазы с линейным МЭ эффектом сопровождается структурным фазовым переходом, то есть, как и в случаях классических мультиферроиков второго рода, снижение кристаллической симметрии связано с существованием предшествующей переходу магнитной неоднородности.

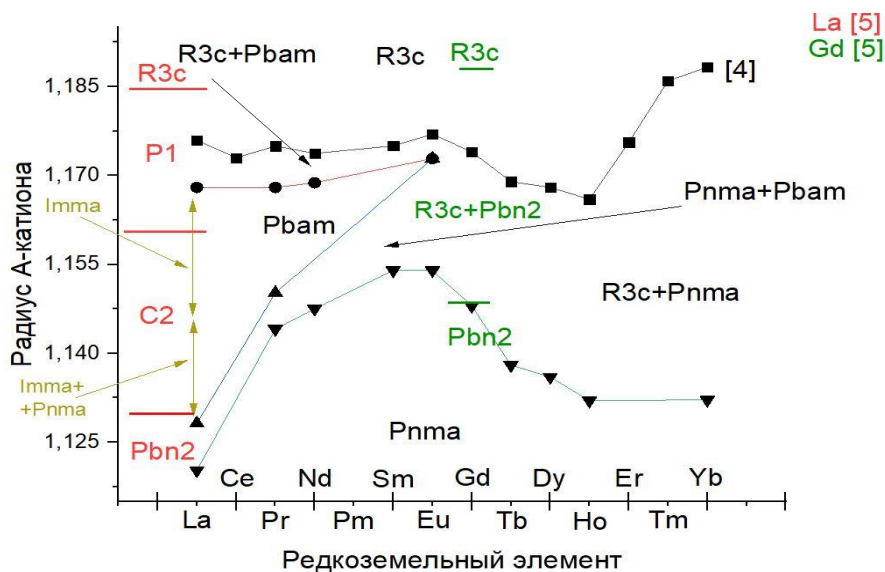


рис.1. Фазовая диаграмма феррита висмута, легированного редкоземельными элементами в координатах: средний радиус А-катиона – редкоземельный элемент

С точки зрения практического материаловедения, наиболее привлекательным является создание сред на основе  $\text{BiFeO}_3$  с линейным МЭ эффектом на основе химического модифицирования. Феррит висмута - термодинамически неустойчивое соединение, которое крайне трудно получить в чистом виде путем классического твердофазного синтеза. Одним из путей стабилизации его структуры является введение редкоземельных элементов (РЗЭ).

На рис.1 представлена фазовая диаграмма, иллюстрирующая изменение симметрии твердых растворов на основе  $\text{BiFeO}_3$  при введении РЗЭ, построенная по литературным данным [4,5]. Несмотря на существующий разброс в результатах различных авторов относительно концентрационной границы, пространственных групп и образующихся фаз, видно, что при добавлении РЗЭ происходит фазовый переход в низкоразмерную фазу, сопровождающийся изменением магнитной симметрии. Таким образом, известные данные позволяют надеяться, что при тщательном изучении свойств твердых растворов на основе  $\text{BiFeO}_3$  с РЗЭ, в том числе, с использованием электрических и магнитных полей, могут быть обнаружены новые состояния с линейным МЭ эффектом, чему и будет посвящен доклад

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/Г30110/23-11-ИФ на оборудовании Центра коллективного пользования «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел» НИИ физики ЮФУ.

Список публикаций:

- [1] Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов, Н. Н. Крайник, Р. А. Крайник, Р. Е. Пасынков, А. И. Соколов, Н. К. Юшин // Физика сегнетоэлектрических явлений — Л.: Наука, 1985. —396с.
- [2] Д. И. Хомский // ЖЭТФ, 2021, том 159, вып. 4, стр. 581–593
- [3] Вевцев Ю.И., Гагулин В.В., Любимов В.Н. // Сегнетомагнетики. М.: Наука. 1982. 223с
- [4] Donna C. Arnold // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 62, No. 1, January 2015, p.62-82
- [5] Juli'an Andr'es Mun'ev'ar Cagigas, Dalber Sanchez Candela and Elisa Baggio-Saitovitch // International Conference on Magnetism (ICM 2009) IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 200 (2010) 012134



## Вычисление сингулярных интегралов по зоне Бриллюэна

Коробко Кирилл Вячеславович

Кемеровский государственный университет

Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.

[kirillir99@mail.ru](mailto:kirillir99@mail.ru)

В настоящее время в расчётах электронной структуры с использованием теории функционала плотности (ТФП) очень популярными для аппроксимации обменно-корреляционной энергии являются гибридные функционалы. Одним из преимуществ таких функционалов является полное исключение или значительное уменьшение влияния эффекта самодействия, что в совокупности с современными формами обменных и корреляционных ТФП-функционалов, приводит к значительному увеличению точности количественных оценок ряда физических характеристик. Более сложная форма гибридных функционалов приводит к увеличению вычислительных затрат, а так же к повышению требований точности, в особенности для периодических систем, когда основным базисом являются плоские волны. В этом случае выражения для обменной энергии и потенциала принимают форму интеграла по обратному пространству, подынтегральная функция которого имеет существенную особенность, не позволяющую применять стандартные методы интегрирования, такие как метод специальных точек [1,2]. Простым вариантом решения этой проблемы является исключение сингулярности выражения для обменной энергии путём добавления и вычитания вспомогательной функции, имеющей аналогичную особенность, но простое аналитическое представление [3], что позволяет выразить обменную энергию и потенциал в виде регулярного выражения с аддитивной поправкой.

Целью работы является разработка метода вычисления отмеченной выше поправки, который наиболее естественно учитывает характер сингулярности в выражении для обменной энергии и потенциала, а также и оценка его вычислительной эффективности точности.

После преобразований аналогичных работе [4], изолированная особенность выглядит следующим образом:

$$F = \frac{\Omega_0}{(2\pi)^3} \int_{(BZ)} f(\mathbf{k}) d\mathbf{k}, \quad (1)$$

где  $f(\mathbf{k})$  вспомогательная функция, имеющая особенность типа  $k^{-2}$ . Следуя подходу работы [5] интеграл (1) можно разбить на две части  $F = F_1 - F_2$ , где:

$$F_1 = \frac{\Omega_0}{(2\pi)^3} \int_{(BZ)} f(\mathbf{k}) w(\mathbf{k}) d\mathbf{k} \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{\Omega_0}{(2\pi)^3} \int_{(BZ)} f(\mathbf{k}) [1 - w(\mathbf{k})] d\mathbf{k} \quad (3)$$

где  $w(\mathbf{k})$  сферически симметричная функция  $0 \leq w(\mathbf{k}) \leq 1$ .

Для численного расчета (2) можно использовать сферическую сетку, узлы и веса которой в простейшем случае являются прямым произведением радиальной и двух угловых сеток одномерных квадратур Гаусса-Чебышева, которые в выбранной системе координат для радиальной части в точности компенсируют особенность типа  $k^{-2}$ , а для угловой части, плавный характер  $w(\mathbf{k})$  обеспечивает быструю сходимость. При вычислении в выражении (3) можно применять классический метод специальных точек [1,2].

По вышеизложенному методу, для оценки точности и эффективности расчета (1) были проведены расчеты для: простой (SC), гранецентрированной (FCC) и объемно-центрированной (BCC) кубических решеток. Результаты показали, что сходимость результатов порядка  $10^{-6}$  обеспечивается для сеток  $10 \times 10 \times 20$ , а для схемы  $40 \times 40 \times 80$  уже порядка  $10^{-13}$ - $10^{-14}$ .

Для оценки точности полной схемы вычисления обменной энергии с использованием выражения (1) использовалась модель, предложенная в работе [6]. Выявлено, что регулярный и сингулярный вклады в обменную энергию почти в точности компенсируют погрешности друг друга и на сетках  $10^3$  обеспечивают точность порядка  $10^{-5}$  а.е. (0.0004 эВ).

Список публикаций:

- [1] Chadi D. J., Cohen M. L. (1973) *Physical Review B*. 8. pp. 5747-5753.
- [2] Monkhorst H. J., Pack J. D. (1976) *Physical Review B*. 13. pp. 5188-5192.
- [3] Gygi F., Baldareshi A. (1986) *Physical Review B*. 34. pp. 4405-4408.
- [4] Carrier P., Rohra S., Görling A. (2007) *Physical Review B*. 75. pp. 205126(1-10).
- [5] Becke, A.D. (1988) *Journal of Chemical Physics*. 88. pp. 2547-2553.
- [6] Holzwarth N. A. W., Xiao Xu (2011) *Physical Review B*. 84. pp. 113102(1-4)

## Молекулярно-динамическое моделирование кристалла Pt<sub>2</sub>Al

Кочкин Андрей Сергеевич<sup>1,2</sup>

Теников Кирилл Андреевич<sup>1</sup>, Янковская Устина Ильдусовна<sup>1</sup>, Мороз Тимофей Андреевич<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Алтайский государственный университет

<sup>1</sup>Алтайский государственный технический университет

<sup>1</sup>Старостенков Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н.

[andre211@mail.ru](mailto:andre211@mail.ru)

В данном исследовании проведён анализ кристаллической структуры соединения Pt<sub>2</sub>Al с целью выявления возможности возбуждения уединённых волн в этой структуре. Анализ кристаллической структуры Pt<sub>2</sub>Al имеет важное значение для понимания процессов возникновения таких волн в кристаллических материалах.

Следует отметить, что этот сплав остаётся мало изученным, однако его исследование представляет собой значимый интерес для новых перспективных конструкционных и функциональных материалов. Например, он может привлечь внимание исследователей в контексте дискретных бризеров. Исследованию Pt<sub>2</sub>Al посвящён ряд работ [1-3].

С применением методов молекулярной динамики проведено исследование процессов формирования уединённых волн в реакции на воздействие различных внешних факторов. Одним из определяющих факторов в передаче энергии в дискретной среде является частота внешнего воздействия. Для более детального анализа использовалась расширенная суперячейка, включающая 192 000 атомов и ориентированная в трех измерениях на основе элементарной ячейки кристалла. Это позволило более глубоко изучить взаимодействие кристалла с окружающей средой, такое как адсорбция газов или химические реакции [4-5]. Начальным этапом работы стало формирование структуры элементарной ячейки кристалла.  $a = 4.08 \text{ \AA}$ ,  $b = 5.41 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.94 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 90.00^\circ$ ,  $\beta = 90.00^\circ$ ,  $\gamma = 90.00^\circ$ , объём =  $175.28 \text{ \AA}^3$ . Решётка орторомбическая. Атомные позиции элементов в элементарной ячейке представлены в таблице 1.

Wyckoff позиция	Элемент	x	y	z
4c	Al	3/4	0.811904	0.896902
4c	Pt	3/4	0.45454	0.290559
4c	Pt	3/4	0.341208	0.930861

Таблица 1. Атомные позиции элементарной ячейки [3]

В рамках программы LAMMPS [6] проводилось изменение параметров кристаллической решетки для исследования запрещенной зоны в фоновом спектре материала. Для визуализации структуры кристалла была применена программа OVITO [7], предоставляющая возможность анализа как общей структуры кристалла, так и его отдельных плоскостей. Например, с использованием OVITO можно визуально выделять определенные плоскости кристаллической решетки, включая плоскость, на которой располагается дискретный дефект, для выявления динамики колебаний внутри кристалла. Было изучено распространение уединённых волн. Эти исследования способствуют более глубокому пониманию влияния различных частот и амплитуд внешних воздействий на свойства и поведение материала Pt<sub>2</sub>Al. Кроме того, изучались оптимальные условия для формирования дискретных бризеров и уединённых волн в этом соединении. Полученные результаты могут послужить основой для разработки инновационных методов контроля свойств материалов, открывая новые возможности в области технологий и научных исследований.

Список публикаций:

[1] M. Sauer, A. Engel, and H. Lueken // *Journal of Alloys and Compounds*. 1992. V. 183. P. 281–287.

[2] Chattopadhyay T.K and Schubert K. // *Journal of the Less-Common Metals*. 1975. V. 41. P. 19–32.

[3] Ricci, F., Chen, W., Aydemir, U., Snyder, G. J., Rignanese, G.-M., Jain, A., & Hautier, G. // *Scientific Data*. 2017. V. 4. p.170085.

[4] Чередниченко А. И., Захаров П. В., Старостенков М. Д., Сысоева М. О., Ерёмин А. М. // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2019. Т. 11. № 1. С. 109–117.

[5] Ndjomatchoua F. T., Tchawoua C., Kakmeni F. M. M., Le Ru B. P., Tonnang H. E. Z. // *Chaos*. 2016. V. 26, No. 5. P. 053111.

[6] LAMMPS Molecular Dynamics Simulator. URL: <https://lammps.org/>.

[7] Information about Ovito. Simulation visualization. URL: <https://www.ovito.org/>

## Влияние примеси оксида циркония на процессы спекания на примере твёрдых растворов титаната-цирконата бария

Максименкова Мария Андреевна

Королькова Анастасия Сергеевна, Волков Дмитрий Вячеславович

Южный федеральный университет

Волков Дмитрий Вячеславович

[dvvolkov@sfedu.ru](mailto:dvvolkov@sfedu.ru)

Эффекты модифицирования поликристаллических материалов могут оказывать критическое влияние на свойства исходных соединений как за счёт изменения их структуры, так и в результате трансформации диэлектрических свойств межкристаллитных прослоек. Доли модификаторов, необходимые для проявления новых макрооткликов и изменения ранее наблюдаемых, оказываются относительно малы и часто сопоставимы с процентным содержанием примесей, содержащихся в исходном сырье или возникающих как побочный продукт в процессах синтеза и спекания. Одним из важных технологических этапов в производстве поликристаллических керамических материалов является механоактивация. Механоактивацией называют процесс, при котором вследствие механического воздействия, как правило, в среде поверхностно-активных веществ, повышается поверхностная потенциальная энергия и возникает поле деформационных напряжений. Повышенная потенциальная энергия материала проявляется в увеличении удельной поверхности реакции, формировании вакансий и дислокаций, увеличении границ зёрен. Также она может приводить к формированию метастабильных фаз с более высокой энергией, появлению более высоких степеней окисления, изменению длин, углов и энергий связей и повышению уровня энергии электронов [1]. Для механоактивации синтезированный порошок или иное исходное сырье в виде порошка, загружают в стальные барабаны с внутренним керамическим покрытием и измельчительными шарами из  $ZrO_2$ . При длительной работе мельницы образуется естественный намол от измельчительных шаров, который может, как способствовать образованию целевых продуктов реакции, так и привести к образованию новых примесных фаз.

В данной работе в качестве объекта исследования были выбраны твёрдые растворы (ТР)  $BaTi_{0.95}Zr_{0.05}O_3$ , которые перед спеканием были подвергнуты механоактивации с разными интервалами времени (10-40) минут. Для образования структуры перовскита в ТР  $Ba(Ti, Zr)O_3$  требуются высокие температуры спекания, вплоть до 1900 К [2, 3]. Процедура механоактивации может помочь снизить итоговую температуру спекания, повысить плотность керамики, но при этом увеличить мольную долю  $Zr^{4+}$ , тем самым изменить параметры структуры, микроструктуры и диэлектрические отклики. Таким образом целью работы стало установление влияния примеси оксида циркония на структурные и микроструктурные характеристики, а также макроотклики, проявляемые в ТР  $BaTi_{0.95}Zr_{0.05}O_3$ .

ТР  $BaTi_{0.95}Zr_{0.05}O_3$  получали методом двухстадийного твердофазного синтеза, при подборе оптимальных температур  $T$  и времени  $\tau$ . Выбор оптимальных режимов изготовления проводился на серии экспериментальных образцов с поэтапным контролем фазового состава при помощи рентгеновской дифракции. Спекание проводили по обычной керамической технологии. В качестве исходного сырья использовали:  $BaCO_3$  (ОСЧ),  $ZrO_2$  (Ч),  $TiO_2$  (Ч). Рентгенографические исследования проводились с использованием дифрактометра ДРОН-3, на длине волны излучения  $Co_{K\alpha}$  (схема фокусировки по Брэггу - Brentano). Съёмка осуществлялась при комнатной температуре. Фотографии микроструктуры образцов получали при помощи растрового электронного микроскопа JSM-6390L с системой микроанализаторов фирмы Oxford Instruments. Исследование диэлектрических характеристик проведено в интервале температур (300...500) К с использованием заливного азотного криостата и диапазоне частот ( $10^2...10^6$ ) Гц с помощью прецизионного измерителя Agilent E4980A.

В работе получены данные о структурных параметрах, относительной плотности и температурах фазового перехода, которые имеют нелинейную зависимость от времени релаксации. Обсуждаются причины наблюдаемых эффектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета "Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел".

Список публикаций:

- [1] Полубояров В.А., Андрюшкова О.В., Паули И.А., Коротаева З.А. Влияние механических воздействий на физикохимические процессы в твердых телах: моногр. // Новосибирск: Изд-во НГУ. 2011. С.604.
- [2] Maiti T., Guo R., Bhalla A.S., Evaluation of Experimental Resume of  $BaZr_xTi_{1-x}O_3$  with Perspective to Ferroelectric Relaxor Family: An Overview // *Ferroelectrics*. 2011. V. 425. P. 4-26.
- [3] Petzelt J., Bovtun V., Nuzhnyy D., Kempa M., Savinov M., Paściak M., Kamba S., Canu G., Buscaglia V. Broadband Dielectric, Terahertz, and Infrared Spectroscopy of  $BaTiO_3$ - $BaZrO_3$  Solid Solution: From Proper Ferroelectric over Diffuse and Relaxor Ferroelectrics and Dipolar Glass to Normal Dielectric // *Physica Status Solidi B*. 2021. V. 258, P. 2100259 (1-15).

# Диэлектрические и пьезоэлектрические свойства высокотемпературных сегнетоэлектрических твердых растворов системы $(1-x)\text{BiScO}_3-x\text{PbTiO}_3$

Мартыненко Александр Александрович

Глазунова Екатерина Викторовна

Южный федеральный университет

Павелко Алексей Александрович

[alekmar@sfedu.ru](mailto:alekmar@sfedu.ru)

Высокотемпературная (ВТ) пьезоэлектрическая керамика широко используется при контроле исправности конструкций, неразрушающем контроле газотурбинных двигателей нового поколения, электронном впрыске топлива для двигателей внутреннего сгорания и т. д. [1,2]. В настоящее время наиболее широко применяемыми ВТ-пьезоэлектриками являются керамические твердые растворы на основе системы  $\text{PbZrTiO}_3$  (PZT), обладающие высокой температурой Кюри ( $T_C \approx 360^\circ\text{C}$ ) и пьезоэлектрическим модулем ( $d_{33} \approx 350$  пКл/Н) вблизи морфотропной фазовой границы (МФГ), разделяющей тетрагональную и ромбоэдрическую фазы. Максимальные рабочие температуры керамики серии PZT ниже  $230^\circ\text{C}$ , что ограничивает их применение в устройствах, подверженных влиянию более высоких температур [3,4]. В 2001 году Эйтель и др. открыл пьезоэлектрическую керамику  $\text{BiScO}_3\text{-PbTiO}_3$  на основе эмпирической зависимости между геометрическим фактором устойчивости (толеранс-коэффициентом,  $t$ ) и температурой Кюри [5]. Соединение  $\text{BiScO}_3$  ( $t = 0,91$ ) относится к группе перовскитовых соединений, при комнатной температуре обладает спонтанно-поляризованным состоянием с антисегнетоэлектрическим упорядочением, однако может быть синтезировано только при высоких давлениях (6 ГПа) [6]. Титанат свинца  $\text{PbTiO}_3$  ( $t = 1,06$ ) представляет собой сегнетоэлектрическую структуру перовскита с тетрагональной фазой, высокой температурой Кюри ( $490^\circ\text{C}$ ) и кристаллической структурой  $R4mm$ . Из-за большой анизотропии элементарной ячейки синтез данного соединения также затруднен, а спеченная керамика склонна к саморазрушению [7]. Однако твердые растворы с участием этих соединений в некотором диапазоне концентраций компонентов могут быть синтезированы по обычной керамической технологии, методом твердофазного синтеза без приложения давления, обладая при этом выдающимися электрофизическими свойствами. Было установлено, что МФГ в данной системе твердых растворов находится в окрестности  $x = 0,64$ , при которой наблюдается переход из ромбоэдрической в тетрагональную фазу [8]. Данная работа является частью исследования, направленного на разработку ВТ пьезоэлектрических материалов на основе бинарной системы твердых растворов  $(1-x)\text{BiScO}_3-x\text{PbTiO}_3$ .

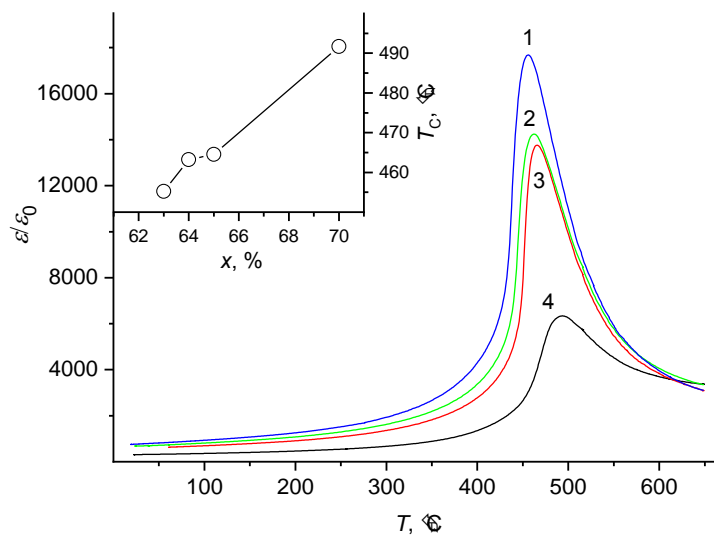


рис.1. Зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon/\epsilon_0$  образцов твердых растворов системы  $(1-x)\text{BiScO}_3-x\text{PbTiO}_3$  от температуры с  $x = 0,63$  (1),  $0,64$  (2),  $0,65$  (3),  $0,7$  (4). На вставке показана зависимость температуры Кюри ( $T_C$ ) полученных образцов от концентрации титаната свинца  $x$ .

В работе рассматриваются вопросы получения и комплексного исследования кристаллической структуры, зеренного строения, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств керамических образцов твердых растворов системы  $(1-x)\text{BiScO}_3-x\text{PbTiO}_3$  с  $x = 60 \dots 70\%$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

- [1] Darnjanovic D. // *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 1998. V.3. P.469–73.  
[2] James F., Tressler S.A., Newnham R.E. // *J Electroceram.* 1998. P.257–72.  
[3] Andryushina I. N., Reznichenko L. A., Alyoshin V. A. et al. // *Ceramics International.* 2013. Vol. 39. No. 1. P. 753-761.  
[4] Dong Y., Zhou Z., Liang R., Dong X. // *J Am Ceram Soc.* 2022. V.105. P. 1558–67.  
[5] Eitel R.E., Randall C.A., Shrout T.R. et.al. // *Jpn J Appl Phys.* 2001. V.40. P.5999–6002.  
[6] Belik A.A., Iikubo S., Kodama K., et al. // *J Am Chem Soc.* 2006. V.128. P. 706–7.  
[7] Belik A.A., Azuma M., Saito T., et.al. // *Chem Mater.* 2005. V. 17. P. 269–73.  
[8] Eitel R.E., Randall C.A., Shrout T.R., Papk S-E. // *Jpn J Appl Phys.* 2002. V. 41. P. 2099–104.

## Магнитоёмкость в твёрдых растворах $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$ при 77 К

Мойса Максим Олегович

Андрюшин Константин Петрович

Южный федеральный университет

Резниченко Лариса Андреевна

[moysa@sfedu.ru](mailto:moysa@sfedu.ru)

Современному этапу развития материаловедения в области электронной техники свойственно проявление трёх качеств: интеллектуализация, экологизация, мультифункциональность. При этом интеллектуальность материалов рассматривается как самодиагностика, противодействие внешним факторам и адаптация к ним. И в наибольшей мере этому определению отвечают сегнетопъезоэлектрики, способные преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Однако, требования экологической безопасности промышленных производств мотивируют исследователей к поиску альтернативных путей создания нетоксичных бессвинцовых композиций. Система ниобатов натрия – калия (KNN) единственная, не содержащая свинец система со структурой типа перовскита, обладающая высокой температурой Кюри и близкими по величине к незаменяемой в мировой практике системе цирконата – титаната свинца пьезоэлектрическими свойствами. Начиная с 2005 г. число публикаций, посвящённых KNN, фактически превысило количество работ по всем остальным бессвинцовым пьезоактивным средам [1]. Также необходимо отметить, что возможности создания новых, экологически чистых сегнетопъезоматериалов, исчерпаны из-за практически полного использования существующих химических основ и способов их получения. Это породило стремление к совмещению в одной химической композиции нескольких разнородных функций. В связи с чем взоры многих исследовательских групп были обращены к ферриту висмута,  $\text{BiFeO}_3$  (BFO), – единственному однофазному мультиферроидному материалу, одновременно обладающему при комнатной температуре магнитным и сегнетоэлектрическим упорядочениями. Это сделало BFO объектом пристального внимания исследователей, исследовавших этот мультиферроик в различных технологических стратегиях, включая фазовую и доменную инженерии [2], легирование [3] и конструирование систем твёрдых растворов (ТР) [4]. Среди последних, в силу вышесказанного, наибольший интерес вызывает тройная система ТР KNN – BFO и композиции с её участием. В работе [5] нами были синтезированы ТР системы  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$ , найдены оптимальные условия приготовления и построена фазовая диаграмма системы. Настоящая работа посвящена установлению закономерностей формирования магнитоёмкости ТР системы  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$  при 77 К и 300 К.

В качестве объектов исследования выступили ТР составов  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$   $x = 0.85..0.95$ . Образцы получены твердофазным синтезом в две стадии и спечены по обычной керамической технологии ( $T_{\text{синт.1}} = 1123$  К,  $\tau = 4$  ч.,  $T_{\text{синт.2}} = 1123$  К,  $\tau = 4$  ч.;  $T_{\text{спек.}} = 1223$  К).

Исследование зависимости ёмкости от частоты измерительного переменного электрического поля  $f = (25...10^6)$  Гц при постоянном магнитном поле 0.85 Тл проводилось на неполяризованных образцах с помощью измерительного стенда на базе LCR-метра Agilent 4980A. Оценка магнитоёмкости производилась по формуле

$$MD(B) = \frac{C(B) - C(0)}{C(0)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $C(B)$  и  $C(0)$  - ёмкости, измеренные в переменном электрическом поле с круговой частотой  $\omega = 2\pi f$  и напряжённостью  $E$  в присутствии,  $C(B)$ , и в отсутствии,  $C(0)$ , постоянного магнитного поля.

Была исследована ёмкость ТР системы  $(1-x)(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-x\text{BiFeO}_3$  с  $x = 0.85...0.95$  в магнитном поле 0.85 Тл при температурах 77 К и 300 К. Установлено, что в указанных ТР ёмкость под воздействием магнитного поля изменяется в пределах погрешности при исследуемых температурах, исключением является лишь ТР состава  $0.10(\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5})\text{NbO}_3-0.90\text{BiFeO}_3$  при 77 К. В данном случае при частоте 1 kHz  $MD = 0.124\%$ .

Данное значение магнитоэлектрического коэффициента может быть обусловлено комбинацией магнитоэлектричества и поляризации Максвелла-Вагнера [6], присутствующих в данном объекте.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

- [1] Wu J. // *Journal of Applied Physics*. 2020. V. 127. Art. numb. 190901.
- [2] Liu Y. et al. // *Progress in Materials Science*. 2022. V.127. Art. numb. 100943
- [3] Zheng T., Wu JG. // *J Mater Chem C*. 2015. V.3. №15. p.3684–3693.
- [4] Bhattacharjee S., Pandey D. // *J Appl Phys*. 2011. V.110. №8. Art. numb. 084105
- [5] Moysa M.O. et al. // *Springer Proceedings in Materials*. 2024. V.41. p. 78–84
- [6] Catalan G. // *Appl. Phys. Lett*. 2006. V.88. Art. numb 102902

## **Изучение оптического спектра поглощения полидифениленфталаида допированного углеродными наноматериалами**

**Мукминова Регина Рустамовна**

*Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы*

*Каримов Рамис Хамитович*

*[mukminova.regina.01@mail.ru](mailto:mukminova.regina.01@mail.ru)*

Применение органических материалов в электронике становится обычным явлением. Область их применения достаточно широкая. Это светодиоды, сенсоры, фотовольтаика и др. Расширяется спектр материалов, используемых для получения указанных устройств. Перспективным материалом, обладающий интересными свойствами, является полимер из класса полигетероариленов – полидифениленфталаид (ПДФ) [1]. Данный полимерный материал обладает устойчивостью к агрессивной среде, высоким температурам и позволяет получать тонкие пленки толщиной до 5 нм. Несмотря на довольно большой перечень эффектов, обнаруженных на данном материале, он относится к диэлектрикам с шириной запрещенной зоны в ~4 эВ. Высокая электропроводность в данном материале индуцируется внешними воздействиями либо допированием.

Целью настоящей работы является изучение вклада графена RG-S1 [2] на оптические свойства ПДФ. В рамках данной работы был выбран метод, основанный на изучении спектров ультрафиолетового поглощения, а также метод Тауца [3] для оценки ширины запрещенной зоны полученного композита.

Методика изготовления тонких пленок осуществлялась в несколько этапов. На первом этапе осуществлялась подготовка растворов полимера и графена. Для равномерного распределения графена в растворе ПДФ, последовательно смесь перемешивалась с помощью магнитной мешалки и в ультразвуковой ванне. На втором этапе проводилась очистка подложек (кварцевого стекла). Предварительно очистку проводили в ультразвуковой ванне в воде и этиловом спирте. Далее очистка проводилась в плазме. На третьем этапе осуществлялось нанесение полимера на поверхность кварцевой подложки. Пленки композита были изготовлены методом центрифугирования. Толщина полимерных пленок чистого ПДФ составляла ~350 нм., допированного графеном ~160 нм.

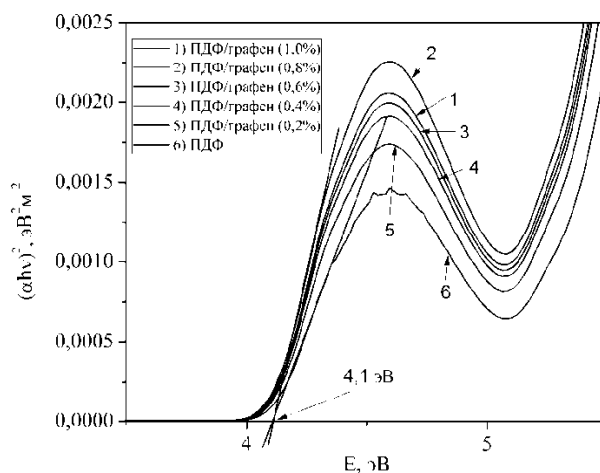


рис.1. Зависимость интенсивности поглощения образцов от энергии падающего излучения.

Спектры поглощения были измерены на спектрофотометре Shimadzu UV – 1800. Полученные спектры, перестроенные в координатах Тауца, представлены на Рисунке 1. Предварительно спектры нормировали по толщине пленки.

По краю оптического поглощения в рамках метода Тауца, была проведена оценка оптической ширины запрещенной зоны, значение которой составило  $\sim 4,1$  эВ для всех экспериментальных образцов. Данный результат позволяет сделать вывод, что допирование ПДФ графеном не оказывает влияние на электронные свойства полученного композита. С ростом концентрации графена в пленке ПДФ, коэффициент поглощения увеличивается. Таким образом, наблюдаемое увеличение оптического поглощения и электропроводности в пленках ПДФ с ростом концентрации графена определяется оптическими свойствами графена и его высокой электропроводностью.

Список публикаций:

[1] Лачинов А. Н., Воробьева Н. В. // УФН. 2006. Т. 176 № 12. С. 1249–1266.

[2] Графеновый порошок RG-S1. URL: <https://www.rusgraphene.ru/product-page/graphene-powder>

[3] Tauc J., Grigorovici R., Vanacu A. // Phys. Status Solidi. 1966. V. 15. P. 627.

## Исследование электрофизических свойств и электронной структуры композитных материалов на основе полианилина

*Недоедкова Ольга Вадимовна<sup>1</sup>*

*Мазка Никита Сергеевич<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Южный федеральный университет

<sup>2</sup>ООО «Артемид», г. Ростов-на-Дону

*Яловега Галина Эдуардовна<sup>1</sup>*

*[nedoedkova@sfedu.ru](mailto:nedoedkova@sfedu.ru)*

Одними из перспективных и активно синтезируемых в последнее время материалов для суперконденсаторов являются композитные системы на основе полианилина (PANI) [1] и оксида графена (GO) [2], обладающие высокой электронной проводимостью. Исследование таких многокомпонентных систем является необходимой задачей для усовершенствования и разработки новых методик синтеза и новых композитных материалов, которые обладали бы улучшенными свойствами, для дальнейшего использования в электронных устройствах.

В данной работе методом Холла изучены электрофизические характеристики композитных материалов на основе полианилина (PANI), оксида графена (GO) и марганца. Было проведено сравнение этих характеристик, например, удельной проводимости, композитных систем состава GO-PANI и GO-PANI-Mn с мономатериалами GO и PANI. Показано, что электрическая проводимость композитов значительно выше, чем мономатериалов и обусловлена подвижностью носителей заряда.

Эти результаты подтверждаются и спектрофотометрией: по данным УФ-видимых спектров поглощения были построены графики Тауца, и показано, что ширина оптической запрещенной зоны ( $E_g$ ) композита GO-PANI увеличивается при добавлении металла, но уменьшается по сравнению с PANI (рис. 1). Уменьшение  $E_g$  обусловлено появлением новых уровней энергии возбуждения, вследствие переноса заряда с GO на PANI. Добавление марганца увеличивает запрещенную зону образца GO-PANI-Mn предположительно, вследствие упорядочения структуры.

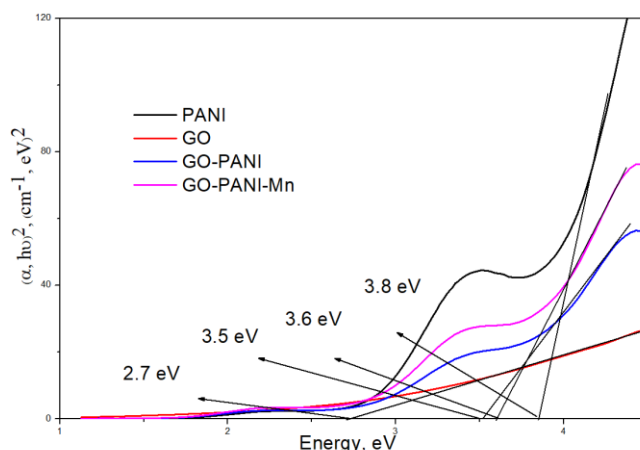


рис.1. Графики Тауца: оптическая ширина запрещенной зоны ( $E_g$ ) PANI, GO, GO-PANI, GO-PANI-Mn

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №23-22-00459 в Южном федеральном университете.

Авторы выражают благодарность Мясоедовой Т.Н. за предоставление образцов для исследования и проведение холловских измерений.

Список публикаций:

[1] Beygisangchin M, Abdul R. S, Shafie S, Sadrolhosseini A. R., Lim H. N. *Thin Films - A Review. Polymers (Basel)*. 2021. V. 13, iss. 12. P. 2003.

[2] Muschi M., Serre C. *Coordin. Chem. Rev.* 2019. V. 387. P. 262-272.

## Влияние условий синтеза и термических обработок на свойства соединений $\text{Fe}_{0.25}\text{TaCh}_2$ ( $\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$ )

Носова Наталья Максимовна

Селезнева Надежда Владимировна, Баранов Николай Викторович

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Баранов Николай Викторович, д.ф.-м.н.

[toporova.natalia@urfu.ru](mailto:toporova.natalia@urfu.ru)

Настоящая работа посвящена исследованию кристаллической структуры и физических свойств соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaCh}_2$  ( $\text{Ch} = \text{S}, \text{Se}$ ), прошедших различную термообработку. Анализ данных, опубликованных разными авторами, показывает, что существует большой разброс значений магнитных характеристик этих соединений [1,2], однако причины расхождения значений температуры Кюри  $T_C$  в системе  $\text{Fe}_x\text{TaS}_2$  при  $0.25 \leq x < 0.29$  (от 70 до 160 К [3, 4]) и значений коэрцитивной силы  $H_C$  кристаллов  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$  (от 27 кЭ до 70 кЭ [1]) пока не выяснены. Можно предположить, что магнитные свойства соединений  $\text{Fe}_x\text{TaS}_2$  с  $x \sim 0.25$  существенно зависят, не только от концентрации атомов Fe [1, 2], но и от способа синтеза и термообработки образцов. В связи с этим, в данной работе методом твердофазных реакций при температуре синтеза  $T = 700$  °С при использовании разных термообработок были синтезированы поликристаллические образцы соединений  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaS}_2$  и  $\text{Fe}_{0.25}\text{TaSe}_2$ , которые были подвергнуты охлаждению при разных условиях: Q-образцы закаливались в ледяной воде сразу от температуры 700 °С; SC-образцы после нагрева до конечной температуры ( $T = 700$  °С) медленно охлаждались со скоростью печи.

Аттестация полученных образцов осуществлялась на дифрактометре Bruker D8 Advance. Магнитные свойства исследовались с помощью СКВИД-магнитометра MPMS (Quantum Design) в температурном интервале 2 – 300 К, а также с помощью вибромагнетометра Lake Shore VSM 7407 в температурном интервале 300 – 1000 К. Электросопротивление полученных соединений измерялось стандартным четырёхзондовым методом на поликристаллических спеченных образцах в интервале температур 5 – 300 К.

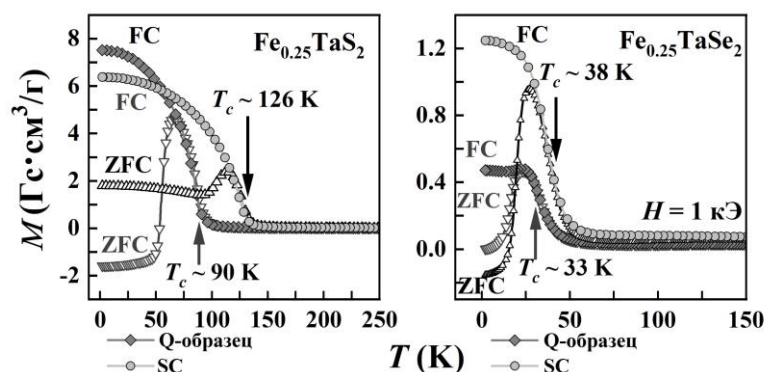


рис.1 Температурные зависимости намагниченности, измеренные при  $H = 1$  кЭ на образцах SC-, Q- $\text{Fe}_{0.25}\text{TaCh}_2$ . Стрелкой указаны значения  $T_C$ , которые были определены по положению минимума на температурных зависимостях производной  $dM/dT$

Установлено, что различные способы приготовления и термообработки не оказывают сильного влияния на параметры элементарной ячейки основной фазы в образцах и фазовый состав образцов. Несмотря на это, образцы, прошедшие различную термообработку, демонстрируют отличные друг от друга значения магнитной критической температуры (рис.1) и значения коэрцитивной силы. Показано, что у закаленного образца существенно сниженное значение  $T_C$  по сравнению с медленно охлажденным образцом. Предполагается, что такое различие в значениях  $T_C$  может быть связано с частичным перемешиванием атомов тантала и железа при



быстрой закалке, что приводит к размещению атомов железа как в слое тантала в тригонально-призматическом окружении, так и между  $Ch-Ta-Ch$  сэндвичами в октаэдрическом окружении, где атомы Fe обладают низко-спиновым и высоко-спиновым состоянием, соответственно. Обнаружено, что условия термообработки и охлаждения образцов  $Fe_{0.25}TaCh_2$  также влияют и на кинетические свойства соединений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-13-00158).

Список публикаций:

- [1] Choi Y. J. // *Europhysics Letters*. 2009. V. 86. P. 37012.
- [2] Hardy W. J. // *Phys. Rev. B*. 2015. V. 91. P. 054426.
- [3] Kim C. M. // *J. Korean Phys. Soc.* 2012. V. 60. P. 79–82.
- [4] Morosan E. // *Phys. Rev. B*. 2007. V. 75. P. 104401.

## **Исследование высокоэнтропийных редкоземельных ортоферритов методом мессбауэровской спектроскопии**

*Пикуть Анастасия Денисовна<sup>1</sup>*

*Тер-Оганесян Никита Валерьевич<sup>1</sup>*

*Jian Zhuang<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Южный федеральный университет*

<sup>2</sup>*Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049, China*

*Кубрин Станислав Петрович, д.ф.-м.н.*

*[nasta.pikul.34@gmail.com](mailto:nasta.pikul.34@gmail.com)*

Получение стабильных однофазных соединений путём увеличения энтропии за счёт использования большого числа катионов, как правило 4 или 5, стало важной исследовательской задачей в последние годы [1,2]. Высокоэнтропийные сплавы и оксиды со структурой перовскита демонстрируют улучшенные свойства, среди которых сегнетоэлектрические, релаксорные и магнитные свойства, а также ионная проводимость. Синтезированное соединение  $(La_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Dy_{0.2}Gd_{0.2})FeO_3$  обладает пятью различными катионами в составе А-подрешетки и является высокоэнтропийным оксидом редкоземельных ортоферритов ( $REFeO_3$ ).

После синтеза порошки образцов  $(La_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Dy_{0.2}Gd_{0.2})FeO_3$  были перетёрты, спрессованы и спечены в интервале температур от 1250 °C до 1500 °C. С помощью спектрометра MS1104Em было проведено мессбауэровское исследование образцов  $(La_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Dy_{0.2}Gd_{0.2})FeO_3$ , источником  $\gamma$ -квантов служил  $^{57}Co$  в матрице родия.

В результате модельной расшифровки мессбауэровских спектров образцов  $(La_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Dy_{0.2}Gd_{0.2})FeO_3$  выяснилось, что они включают в себя два секстета. Для спектров всех образцов изомерные сдвиги секстетов составляют  $\delta = 0.370 \pm 0.002$  мм/с в сравнении с металлическим  $\alpha$ -Fe. Секстеты обладают значениями сверхтонких магнитных полей  $H$  в интервалах  $503 \pm 2$  кЭ и  $510 \pm 2$  кЭ, а также имеют квадрупольные смещения  $\varepsilon$ , отличающиеся по знаку и значениям. Секстет с меньшим значением  $H$  обладает отрицательным значением  $\varepsilon_1 \approx -0.005 \pm 0.002$  мм/с, а секстет с большим значением  $H$  положительным значением  $\varepsilon_2 \approx 0.006 \pm 0.002$  мм/с. Знак  $\varepsilon$  зависит от ориентации вектора градиента электрического и магнитного полей. Полученные в результате расшифровки мессбауэровских спектров значения сверхтонких параметров могут свидетельствовать о том, что, благодаря высокой энтропии в А-подрешетке, в исследуемой системе  $(La_{0.2}Nd_{0.2}Sm_{0.2}Dy_{0.2}Gd_{0.2})FeO_3$  ионами  $Fe^{3+}$  формируются две магнитные подсистемы с отличающимися ориентациями магнитных моментов. Поскольку температуры синтеза коррелируют с площадями секстетов, то при понижении температур синтеза площади секстетов становятся примерно одинаковыми, а при повышении температуры синтеза возрастает площадь секстета с положительным значением  $\varepsilon$ .

Список публикаций:

- [1] Rost C. M. et al. // *Nature Communications*. 2015. V. 6. P. 8485.
- [2] A. Sarkar. et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. V. 38. P. 2318.

## Исследование магнитокристаллической анизотропии в металлических системах при помощи функций Грина с пространственным разрешением

Подшивалов Алексей Павлович

Кашин Илья Владимирович, Андреев Сергей Николаевич

Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина

[i.v.kashin@urfu.ru](mailto:i.v.kashin@urfu.ru)

В данной работе мы предлагаем теоретический подход, позволяющий изучать эффекты магнитокристаллической анизотропии (МКА) в металлических системах с использованием формализма функций Грина с явным учётом зависимости от вектора обратного пространства. Мы показываем, что такой подход – по отношению к известному методу, основанному на аппарате межзольных функций Грина [1] – обладает большей численной стабильностью при расчёте энергии МКА по отношению к плотности сетки Монкхорста-Пака. Проблема медленной или вовсе отсутствующей сходимости известного подхода при оценке пространственной суммы попарных атомных вкладов может быть здесь полностью устранена благодаря строгой аналитической замене попарного суммирования атомов простой композицией вкладов подрешеток, вычисленных как единое целое.

Подход проверен на эффективной модели одиночного атома, которая, тем не менее, наследует качественную картину МКА монослоя Co и многослойного материала Au/Co/Au. Для этого был произведен расчёт энергии МКА, а также оценен тензор МКА путём отображения исходной электронной модели на эффективную спиновую модель. Первая представляет собой гамильтониан, записанный в приближении сильной связи, а вторая описывает анизотропию спина на уровне парного взаимодействия различных пространственных компонентов этого спина между собой. Численная сходимость предлагаемого метода подтверждена на примере модели одномерной цепочки атомов в выраженной металлической фазе.

В качестве основного объекта для апробации был выбран монооксид кобальта CoO. Эксперименты, выявляющие у монооксидов переходных металлов анизотропные магнитные свойства при различных внешних воздействиях (магнитное поле, давление), известны относительно давно [2]. Теоретические исследования, основанные на расчетах из первых принципов, прослеживают взаимосвязь между природой и выраженностью одноузловой магнитной анизотропии с типом искажения решетки (моноклинная) [3]. МКА в данном соединении носит характер лёгкой оси, однако среди исследований имеются разночтения в оценке её направления [3].

В данной работы угловая зависимость энергии МКА атома кобальта находится в разумном согласии с результатами работы [3]. Также эта зависимость была разложена на составляющие по подрешёткам, и было впервые получено, что доминирующий вклад в энергию вносят подрешётки, локальные спиновые магнитные моменты атомов Co в которых коллинеарны локальному спиновому магнитному моменту того атома Co, для которого вёлся расчёт энергии МКА.

Таким образом, мы показали, что предложенный подход полезен для изучения эффектов магнитокристаллической анизотропии как в модельных, так и в реальных материалах с металлической электронной структурой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-01003, <https://rscf.ru/project/23-72-01003/>

Список публикаций:

[1] V. V. Mazurenko, Y. O. Kvashnin, F. Jin, H. A. De Raedt, A. I. Lichtenstein, and M. I. Katsnelson, *First-principles modeling of magnetic excitations in Mn12* // *Phys. Rev. B*. 2014. № 89. 214422

[2] W.L. Roth, *Magnetic Structures of MnO, FeO, CoO, and NiO* // *Phys. Rev.* 1958. № 110. 1333

[3] A. Schrön, C. Rödl, F. Bechstedt, *Crystalline and magnetic anisotropy of the 3d-transition metal monoxides MnO, FeO, CoO, and NiO* // *Phys. Rev. B*. 2012. № 86. 115134

# Спектр спиновых волн в двухслойной структуре решеток скирмионов

Самигуллина Анжела Ильгизовна

Уфимский университет науки и технологий

Шарафуллин Ильдус Фанисович

[angelasamig2002@gmail.com](mailto:angelasamig2002@gmail.com)

Решетка скирмионов — это упорядоченная структура, состоящая из скирмионов, которые являются особыми объектами в магнетиках. Они представляют собой топологические возмущения, которые могут быть рассмотрены как квазичастицы с нецелым спином. Изучение скирмионов является важным для развития технологий в области магнетизма и магнитных материалов, что открывает новые перспективы для создания современных устройств [1]. Спектр спиновых волн обычно имеет нетривиальную структуру из-за присутствия скирмионов и неоднородности магнитной структуры.

В данной работе рассматриваем систему, состоящую из двух одинаковых слоев, разделенных между собой межслойным антиферромагнитным взаимодействием  $J_3$ . Структура одного слоя представляет собой симметрию простой кубической решетки со спинами Гейзенберга амплитудой  $\frac{1}{2}$ . На узлах решетки спины взаимодействуют друг с другом с помощью ферромагнитного обменного взаимодействия с параметром  $J_1$  для ближайших соседей и антиферромагнитного обмена с параметром  $J_2$  для следующих ближайших соседей вдоль оси  $y$ . Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси  $y$ . Для исследования основного состояния системы и определения типа дальнего порядка воспользуемся Гамильтонианом (1), который описывает взаимодействие спинов в системе. Для этого мы примем, что  $\theta$  — угол между двумя ближайшими соседними спинами в направлении  $y$ .

Рассмотрим следующий Гамильтониан:

$$H = -2J_1 \sum_{i,j} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j - 2J_2 \sum_{i,i'} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i'} - 2g\mu_B h \sum_i S_i^y - J_3 \sum_{i,i'} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i'} \quad (1)$$

где первое слагаемое описывает ферромагнитное взаимодействие между ближайшими соседними спинами, второе — антиферромагнитное взаимодействие между следующими ближайшими соседними спинами вдоль оси  $y$ , третье — взаимодействие со внешним магнитным полем,  $h$  — величина магнитного поля, приложенного вдоль направления  $y$ ,  $g$  и  $\mu_B$  — соответственно фактор Ланде и магнетон Бора, четвертое — антиферромагнитное взаимодействие между двумя одинаковыми слоями.

Для того, чтобы определить спектр спиновых волн, вычислили две функции Грина с использованием приближения Боголюбова-Тябликова. Спектр спиновых волн от вектора представляет собой распределение энергий спиновых волн исследуемой нами физической системе. Без магнитного поля спектр спина начинается с минимума, все возможные состояния спина имеют одинаковую энергию и располагаются на одном уровне энергии. Это связано с тем, что без магнитного поля спиновой спектр представляет собой равномерно заполненные уровни энергии, начиная от минимального значения. Включение магнитного поля приводит к расщеплению энергетических уровней и формированию двух подуровней - с максимальной и минимальной энергией. Поэтому спектр становится более выраженным и можно наблюдать отчетливый пик при определенной энергии.

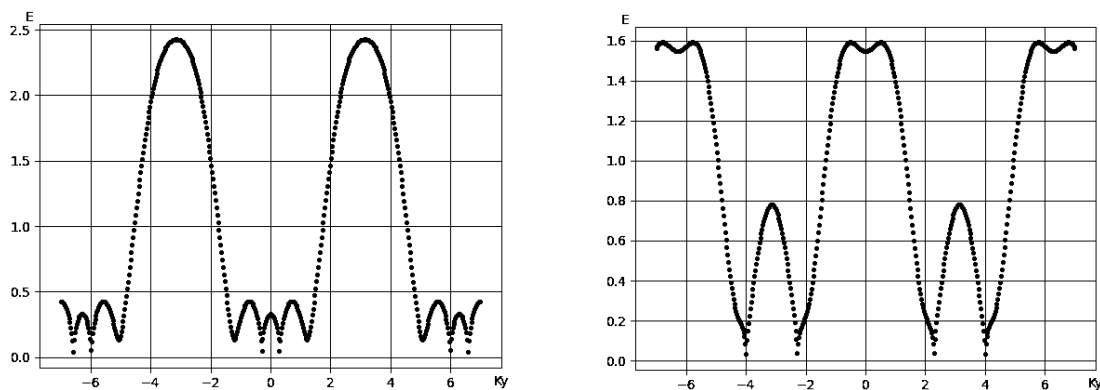


рис. 1 Зависимость энергии от волнового вектора  $k_y$  в двухслойной системе с антиферромагнитным межслойным взаимодействием в простой кубической решетке со спиральной структурой по оси  $y$  в случае  $\theta = \frac{\pi}{3}$ ,  $k_x = k_z = 0$ ,  $J_1 = 2$ ,  $J_2 = -1$ ,  $J_3 = -1$ ,  $\langle S^z \rangle = 0.5$  без внешнего магнитного поля  $h = 0$  (слева), с включенным магнитным полем  $h = 1$ , причем считаем  $g\mu_B = 1$  (справа).

Рассмотрели, как будет изменяться энергетический спектр в промежутке  $J_3 \in [0, -1.5]$  без влияния магнитного поля. Пришли к выводу, что изменение межслойного взаимодействия влияет на форму спектра энергии и положение энергетических состояний, что отражает изменение взаимодействия между слоями в системе.

Список публикаций:

[1] Sahbi El Hog, Sharafullin I.F., Diep H.T., Garbouj H., Debbichi M., Said M. // *Magnetism and Magnetic Materials*. 2022. V. 563. 169920.

## Кристаллическая и электронная структура плёнок $(2\sqrt{3} \times 3)\text{Bi}/\text{InAs}$

Соловова Надежда Юрьевна

Еремеев Сергей Владимирович, Бондаренко Леонид Владимирович, Тупчая Александра Юрьевна, Грузнев Димитрий Вячеславович, Саранин Александр Александрович, Усачёв Дмитрий Юрьевич, Терещенко Олег Евгеньевич  
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Голяшов Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.

[n.solovova@g.nsu.ru](mailto:n.solovova@g.nsu.ru)

В теоретических работах было предсказано, что бислоем висмута, а также тонкие плёнки  $\text{Bi}(111)$  являются моноэлементными двумерными топологическими изоляторами. Однако на электронную и кристаллическую структуру тонких плёнок значительно влияет материал подложки. В данной работе в качестве подложки была выбрана поверхность  $n\text{-InAs}(111)\text{A}$ . На поверхности  $n\text{-InAs}(111)\text{A}$  наблюдается изгиб зон вниз, что приводит к наличию состояний двумерного электронного газа. Влияние спин-орбитального взаимодействия атомов висмута на состояния двумерного электронного газа  $\text{InAs}$  интересно для спинтроники. Из литературы [1] известно, что осаждение  $\text{Bi}$  на поверхности  $\text{InAs}(111)\text{A}$  при комнатной температуре приводит к росту плёнок с электронной и кристаллической структурой, близкой к структуре поверхности  $\text{Bi}(111)$ . Осаждение  $\text{Bi}$  на поверхность  $\text{InAs}(111)\text{A}$  при температуре выше комнатной в литературе не описано. Однако эксперименты по осаждению  $\text{Bi}$  на поверхность  $\text{GaAs}(111)$  показали, что повышение температуры подложки приводит к образованию химических связей между атомами  $\text{Bi}$  и атомами подложки [2].

Цель работы – изучить влияние условий роста тонких плёнок  $\text{Bi}/\text{InAs}(111)\text{A}$  на их кристаллическую и электронную структуру.  $\text{Bi}$  осаждался на подложку  $\text{InAs}(111)\text{A}$ -( $2 \times 2$ ) из эффузионной ячейки Кнудсена при комнатной и высокой ( $\approx 300^\circ\text{C}$ ) температуре. Электронная структура изучалась с помощью фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Для экспериментального изучения кристаллической структуры плёнок применялась рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), дифракция медленных электронов (ДМЭ), рентгеновская фотоэлектронная дифракция (РФД), сканирующая туннельная микроскопия (СТМ). Модель кристаллической структуры была построена с помощью *ab initio* случайного поиска структур и расчетов по теории функционала плотности в программном пакете VASP.

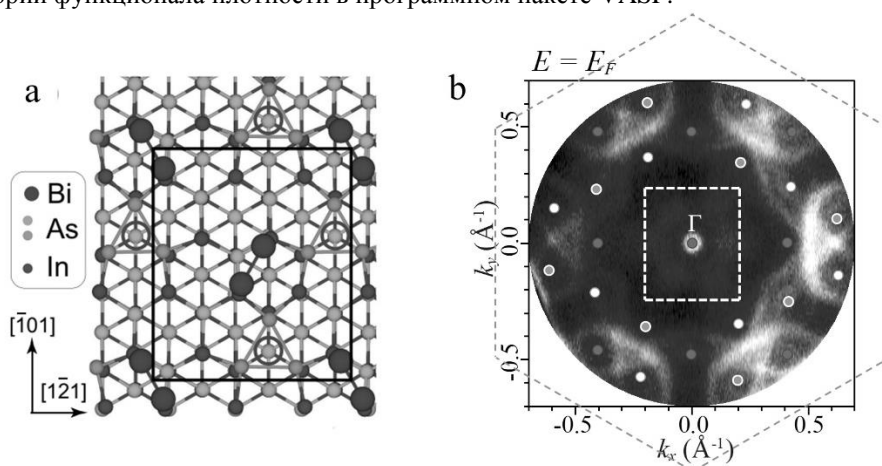


рис.1. а) Модель кристаллической структуры поверхности  $(2\sqrt{3} \times 3)\text{Bi}/\text{InAs}(111)\text{A}$ , полученная *ab initio* случайным поиском структур; б) Карта поверхности Ферми, полученная на плёнке  $(2\sqrt{3} \times 3)\text{Bi}/\text{InAs}(111)\text{A}$  методом ФЭСУР, белым цветом показана граница зоны Бриллюэна сверхструктуры  $(2\sqrt{3} \times 3)$ , а серым цветом – граница зоны Бриллюэна  $\text{InAs}(111)$ -( $1 \times 1$ ).

При высокой температуре подложки ( $\approx 300^\circ\text{C}$ ) рост плёнки ограничен толщиной  $\approx 4 \text{ \AA}$ . Данные СТМ и ДМЭ указывают на формирование поверхностной реконструкции  $(2\sqrt{3} \times 3)$  с прямоугольной элементарной

ячейкой с латеральными размерами  $\sim 13\text{\AA} \times 15\text{\AA}$ . Согласно расчету, сверхструктура ( $2\sqrt{3}\times 3$ ) обусловлена формированием на поверхности InAs димеров висмута (рис. 1a). Атомы висмута в димерах расположены над атомами индия и связаны с ними. Поскольку образование димера над вакансией In энергетически не выгодно, вакансии In, формирующие на чистой поверхности InAs(111)A реконструкцию ( $2\times 2$ ), переупорядочиваются. Также возможно заполнение вакансий In одиночными атомами Bi. С помощью ФЭСУР было выявлено, что в электронной структуре сохраняются состояния двумерного электронного газа. При этом в запрещенной зоне InAs в  $\Gamma$  точках зоны Бриллюэна сверхструктуры ( $2\sqrt{3}\times 3$ ) появляются параболические электронные и дырочные состояния висмута с сильной анизотропией эффективной массы ( $m_e^* \sim 0.2m_0 - 0.6m_0$  и  $m_h^* \sim 0.2m_0 - 0.4m_0$ , где  $m_0$  – масса свободного электрона). (рис. 1b) Общая электронная структура системы ( $2\sqrt{3}\times 3$ )Bi/InAs обладает полупроводниковым характером с шириной запрещенной зоны  $\sim 150$  мэВ.

Список публикаций:

[1] Nicolai L. et al. Bi monocrystal formation on InAs (111) A and B substrates //arXiv preprint arXiv:1807.00306. – 2018.

[2] McGinley C. et al. The interaction of bismuth with the GaAs (111) B surface //Applied surface science. – 1999. – Т. 152. – №. 3-4. – С. 169-176.

## Структура и зонный спектр кристалла $\text{Ca}_2\text{NF}$ с решеткой антихалькопирита

Тимофеев Вячеслав Сергеевич

Кемеровский государственный университет

Гордиенко Алексей Болеславович, д.ф.-м.н.

[slava.timofeev.mail@gmail.com](mailto:slava.timofeev.mail@gmail.com)

Фторнитриды металлов - это относительно малоизученный класс неорганических соединений [1]. В работе [2] были получены кристаллы  $\text{Ca}_2\text{NF}$ , и определена кристаллическая структура методом монокристаллической рентгеновской дифрактометрии. Описанная структура (пространственная группа  $I4_1amd$ ) может рассматриваться как промежуточная между структурами каменной соли (для бинарного соединения CaO) и цинковой обманки (сфалерит). При наличии промежуточного состояния представляет научный интерес предварительное теоретическое рассмотрение кристалла  $\text{Ca}_2\text{NF}$  в структуре антихалькопирита, которая представляет собой двойную ячейку сфалерита, с целью предсказания структуры и некоторых возможных свойств.

Расчёт проводился в локальном приближении теории функционала плотности с обменно-корреляционным функционалом Пердью-Вонга (PW) [3]. Он был выполнен с использованием сохраняющих норму псевдопотенциалов, сгенерированных методом оптимизации сохраняющих норму псевдопотенциалов Вандербиля (ONCVP), предложенного Хаманном в 2013 году [4]. Программная реализация описанных выше методов представлена в пакете прикладных программ Quantum Espresso [5-7].

Квази-ньютоновским методом оптимизации Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно [8] были получены параметры тетрагональной ячейки и равновесные положения атомов кристалла  $\text{Ca}_2\text{NF}$  в структуре антихалькопирита (пространственная группа  $I\bar{4}2d$ ). Параметры  $a = 5.083 \text{\AA}$  и  $c = 10.999 \text{\AA}$  определяют тетрагональное сжатие как  $c/a = 2.164$ , что больше идеального для халькопирита значения, равного 2. Атомы занимают следующие позиции Уайкоффа (Wyckoff) в дробных координатах параметров решетки: Ca – 8d (1/4, -x, 7/8), N – 4b (0, 0, 1/2) и F – 4a (0, 0, 0), где параметр смещения катионов  $x = 0.264$ .

Зонная структура для всех высокосимметричных направлений кристалла  $\text{Ca}_2\text{NF}$  с решеткой антихалькопирита представлен на рис. 1 совместно с полной и парциальными плотностями электронных состояний, построенными для определения структуры зон.

Из рис. 1 видно, что кристалл не является прямозонным, так как максимум валентной зоны наблюдается в точке T, в то время как минимум зоны проводимости находится в точке  $\Gamma$ . Минимальная непрямая ширина запрещенной зоны  $E_g = 0.777$  эВ, но из-за известной проблемы занижения ширины запрещенной зоны были проведены дополнительные калибровочные расчеты на известных бинарных соединениях, которые показали, что псевдопотенциал PW занижает ширину запрещенной зоны в среднем на 25 %. Тогда более реалистичным значением ширины запрещенной зоны является  $E_g = 0.971$  эВ.

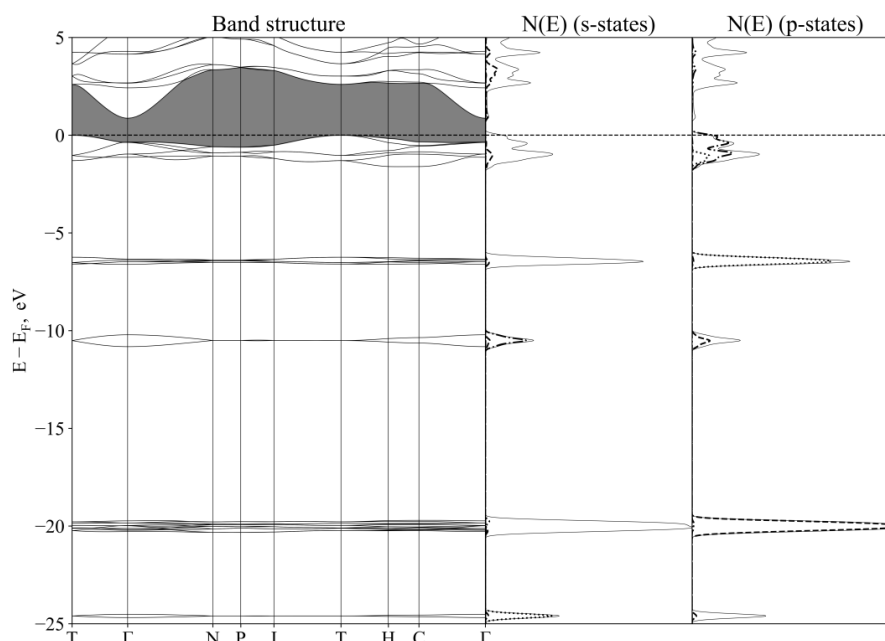


рис.1. Зонная структура, полная и парциальные плотности электронных состояний для  $\text{Ca}_2\text{NF}$  в структуре антихалькопирита. Полная плотность состояний обозначена сплошной линией. Парциальные плотности состояний: Ca – пунктир, N – штрих-пунктир, F – точки.

Структура валентной зоны является нетипичной для классической структуры халькопирита. Валентная зона содержит 4 разрешенных валентных промежутка, скопление полос с энергией порядка -20 эВ принадлежит к 3p состоянию электронов кальция, и его можно отнести к остову. Две разрешенные полосы с энергией около -25 эВ принадлежат 2s состояниям электронов фтора, с энергией около -11 эВ преимущественно 2s состояниям атомов азота с небольшой примесью 4p состояний электронов кальция. Шесть полос с энергией порядка -6 эВ в большинстве своём содержат 2p состояния электронов фтора, а вершина валентной зоны формируется 2p состояниями азота. Состояния 4s электронов кальция определяют форму нижней части зоны проводимости.

Таким образом, согласно нашим расчётам, кристалл  $\text{Ca}_2\text{NF}$  является непрямозонным полупроводником с шириной щели 0.971 эВ.

Дальнейшим путем развития данной работы можно считать исследование динамики решетки с обсуждением стабильности исследуемого соединения.

Список публикаций:

- [1] Gregory D. H. // *Coord. Chem. Rev.* 2001. V. 215. P. 301.
- [2] Nicklow R. A., Wagner T. R., Raymond C. C. // *J. of Solid State Chem.* 2001. V. 160. P. 134.
- [3] Perdew P., Wang Y. // *Phys. Rev. B.* 1992. V. 45. P. 13244.
- [4] Hamman D. R. // *Phys. Rev. B.* 2013. V. 88. P. 085117.
- [5] Giannozzi P., Baroni S., Bonini N. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2009. V. 21. P. 395502.
- [6] Giannozzi P., Andreussi O., Brumme T. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2017. V. 29. P. 465901.
- [7] Giannozzi P., Baseggio O., Bonfà P. et al. // *J. Chem. Phys.* 2020. V. 152. P. 154105.
- [8] Nocedal J., Wright S. J. *Numerical Optimization* // New York : Springer. 2009. Ch. 6.1.

## Динамические эффекты радужного рассеяния атомов на поверхности кристалла

**Хилько Николай Георгиевич**

Южный федеральный университет

Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.

[khilko@sfedu.ru](mailto:khilko@sfedu.ru)

В ряде недавних экспериментальных исследованиях (см., например, [1]) выявлена зависимость углов радужного рассеяния ускоренных атомов поверхностью кристаллов от их начальной энергии. В частности, для ускоренных атомов азота в случае рассеяния поверхностью кристалла алюминия увеличение кинетической энергии частиц сопровождается уменьшением радужного угла при фиксированном значении поперечной компоненты энергии. В случае же рассеяния атомов поверхностью диэлектрика (LiF) при таких же условиях величина радужного угла не зависит от кинетической энергии частиц. В настоящей работе выдвигается

гипотеза, что наблюдаемые динамические явления в рассеянии связаны с диссипативными процессами, которые можно описать, используя зависящий от энергии потенциал взаимодействия в аппроксимации Морзе [2]:

$$V(\vec{r}) = \varepsilon(e^{-2\alpha(r-\sigma)} - 2e^{-\alpha(r-\sigma)}) \quad (1)$$

где  $\varepsilon$ ,  $\alpha$  и  $\sigma$  – подгоночные коэффициенты. Значения зависящих от энергии коэффициентов  $\varepsilon$  и  $\sigma$  приведены в [2]. Процесс рассеяния пучка моделировали путем численного интегрирования классических нерелятивистских уравнений движения каждой отдельной частицы в поле поверхности кристалла алюминия с учетом двухчастичных потенциалов взаимодействия (1). Для набора достаточной статистики накапливали данные для 20000 траекторий.

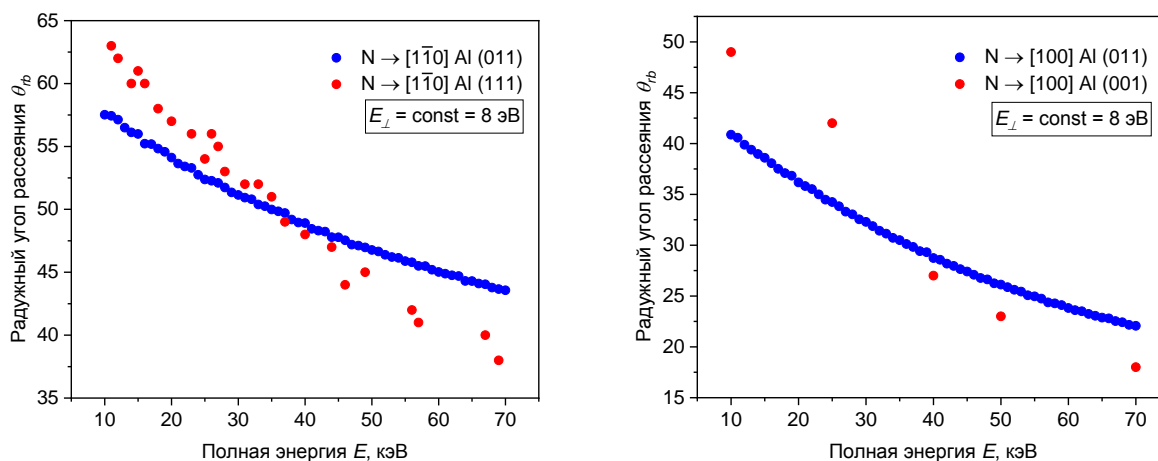


рис. 1. Теоретические (синие точки) и экспериментальные [1] (красные точки) зависимости радужного угла  $\theta_{rb}$  от полной энергии  $E$

Результаты численного моделирования приведены на Рис.1., и показывают качественное совпадение зависимости  $\theta_{rb}$  от  $E$  с экспериментальными данными.

Список публикаций:

- [1] A. Schüller, H. Winter. *Dynamic dependence of the interaction potentials for grazing scattering of fast atoms from metal and insulator surfaces* / A. Schüller, H. Winter // *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B*. 2009. No.267, P. 2621-2624.  
 [2] Е. В. Дергачева, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин. *Динамический потенциал взаимодействия нейтральных атомов с поверхностью кристалла. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2019, № 4, с. 53–55.

## Особенности атомной и электронной структуры композита Co/PAN

**Шишлов Иван Владимирович**

Южный федеральный университет

Шматко Валентина Анатольевна, к.ф.-м.н.

[timi.win1408@gmail.com](mailto:timi.win1408@gmail.com)

Одним из перспективных направлений современной наноэлектроники является получение органических композитов, обладающих уникальными характеристиками. К ним относятся композиты на основе полиакрилонитрила (PAN), обладающие впечатляющими термоустойчивыми, электропроводящими и оптическими свойствами, получаемыми при соответствующих модификациях. Улучшение показателей может достигаться изменением атомной и электронной структуры, внедрением в его структуру добавок из переходных 3d металлов.

В работе исследованы атомная и электронная структура композита полиакрилонитрила с добавлением кобальта на основе анализа экспериментальных рентгеновских фотоэлектронных спектров и спектров рентгеновского поглощения XANES композита Co/PAN, полученного методом пиролиза под воздействием некогерентного ИК-излучения. Рентгеновские спектры поглощения за К-краем кобальта получены на станции КМС-2 синхротронного источника BESSY – 2 (Берлин, Германия). Рентгеновские фотоэлектронные спектры получены при различных значениях энергии фотонов (630 эВ, 500 эВ и 400 эВ) на станции Materials Science синхротронного центра Elettra (Триест, Италия) при давлении остаточных газов в экспериментальной камере  $\sim 10^{-10}$  mbar [1].

Для исследования особенностей электронной структуры и химических связей полученного композита Co/PAN был проведен компонентный анализ линий азота, углерода, кислорода и кобальта. На основе компонентного анализа рентгеновских фотоэлектронных спектров установлено наличие в композите C=C, C-N и C=N связей (рис 1a). Системы полисопряженных связей PAN в композите, вероятно, образуются по двум реакционным каналам – пиролиз с последующим дегидрированием и термоокисление. Азот находится в пиррольной и пиридиновой формах, с наличием неспаренных электронов, и может координироваться с кобальтом. Кобальт находится в композите преимущественно в двухвалентном состоянии.

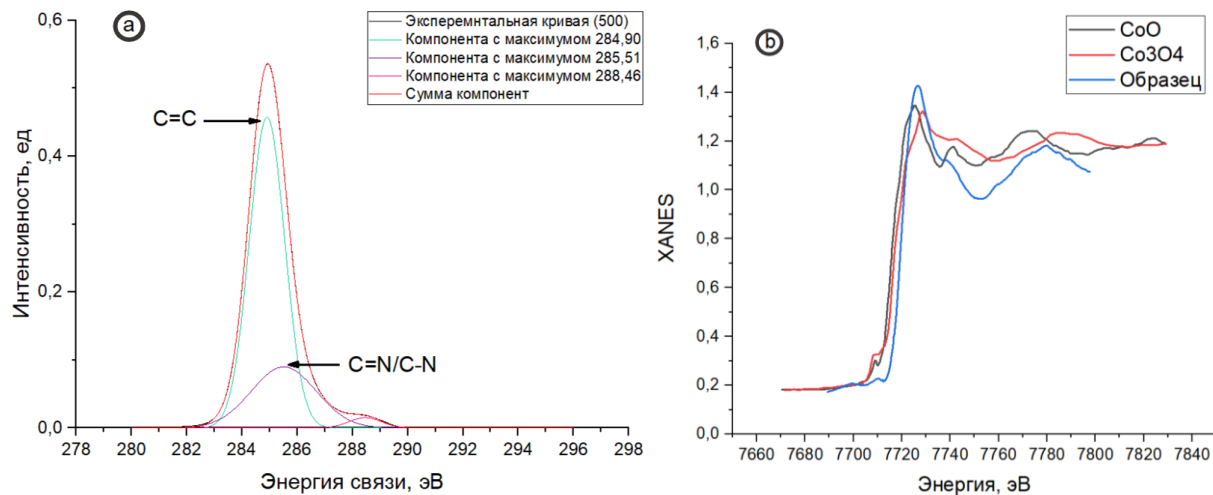


рис. 1. РФЭ-спектр углерода (C1s) композита Co/PAN(a) и РП-спектр К-края Co(b)

Данные, полученные методом спектроскопии рентгеновского поглощения, подтверждают данные РФЭС. На рис. 1b представлено сопоставление XANES спектров для анализа методом «отпечатка пальцев». Из рис. 1 видно, что спектр композита по форме схож со спектром оксида кобальта двухвалентного CoO, хотя наблюдаются и различия. Таким образом, кобальт находится в композите преимущественно в форме 2+, различия в спектрах композита и стандартных соединений, вероятно связаны с тем, что часть ионов кобальта координируется атомами цепочки полиакрилонитрила. Спектры стандартных образцов – CoO, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> взяты из работы [2].

Список публикаций:

- [1] Yalovega G. et al // *Radiation Physics and Chemistry*. 2020. V. 175, 108256  
 [2] Kornienko N. et al. // *Journal of the American Chemical Society*. 2015. V. 137, 7448-7455





### 3 - Физика полупроводников и диэлектриков

Алмаев Дмитрий Александрович, магистрант 2 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет  
**Фотоэлектрические характеристики гексагонального оксида галлия**

Алмаев Алексей Викторович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [almaev001@mail.ru](mailto:almaev001@mail.ru) стр. 79

Бобылев Вячеслав Александрович, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ Физики  
**Запасенная и эффективная энергия в твердом растворе  $(1-x)\text{BaTi0.8Zr0.2O}_3 - x\text{AgNbO}_3$**

Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [slava\\_bobelev@mail.ru](mailto:slava_bobelev@mail.ru) стр. 80

Васильев Владислав, магистрант 2 года обучения  
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики  
**Электрофизические свойства блочных полиуретанов, модифицированных металлокомплексами**

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [vlad.v99@bk.ru](mailto:vlad.v99@bk.ru) стр. 81

Гисматулин Андрей Андреевич, м.н.с.  
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, лаборатория 10  
**Мемристорная память на основе оксидов и нитридов кремния**

e-mail: [aagismatulin@isp.nsc.ru](mailto:aagismatulin@isp.nsc.ru) стр. 82

Дирко Владимир Владиславович, с.н.с.  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет  
**Анализ сближения ступеней при росте Si на Si (001) методом ДБОЭ в условиях сверхвысокого вакуума**

e-mail: [vovenmir@gmail.com](mailto:vovenmir@gmail.com) стр. 83

Есин Егор Сергеевич, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики  
**Диэлектрические характеристики твердых растворов тройной системы  $(1-x-y)\text{VFeO}_3 - y\text{BaTiO}_3 - x\text{PbTiO}_3$**

Болдырев Никита Анатольевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [esin@sfnu.ru](mailto:esin@sfnu.ru) стр. 84

Исламов Дамир Ревинирович, с.н.с.  
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, лаборатория 10  
**Универсальная память: ожидания, реальность и перспективы**

e-mail: [damir@isp.nsc.ru](mailto:damir@isp.nsc.ru) стр. 85

Кукенов Олжас Игоревич, аспирант 1 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Радиофизический  
**Механизмы роста двумерных слоёв Ge на Si(100) при МЛЭ**

Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [okukenov@mail.ru](mailto:okukenov@mail.ru) стр. 86

Латыпова Айназ Рамзиловна, 3 курс  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический  
**Зонная структура  $\text{Cu}_2\text{S}$**

Давлетшина Алиса Данисовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ainazlatypova@gmail.com](mailto:ainazlatypova@gmail.com) стр. 87

Ли Чжэн, 4 курс  
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики  
**Термическая устойчивость сегментированных полиуретанов, модифицированных координационными соединениями меди**

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [czenli01@gmail.com](mailto:czenli01@gmail.com) стр. 88

Мельников Семен Алексеевич, 6 курс, м.н.с.  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физический факультет  
**Влияние сегнетоэлектрических доменных стенок на анизотропию инжекции заряда в монокристаллах MgO:LiNbO<sub>3</sub>**  
Кособоков Михаил Сергеевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [semen.melnikov@urfu.me](mailto:semen.melnikov@urfu.me) стр. 89

Осинных Игорь Васильевич, м.н.с.  
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
**Применение III-нитридов для создания светоизлучающих приборов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и СВЧ-транзисторов**  
e-mail: [igor-osinnykh@isp.nsc.ru](mailto:igor-osinnykh@isp.nsc.ru) стр. 90

Смирнова Ольга Олеговна, аспирант 3 года обучения  
Санкт-Петербург, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, отделение физики твердого тела  
**Эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов в ансамбле коллоидных наноплателетов CdSe/CdS**  
Родина Анна Валерьевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [smirnova.olga248@gmail.com](mailto:smirnova.olga248@gmail.com) стр. 91

Соловьев Никита Николаевич, аспирант 1 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ИШФВП  
**Влияние механического измельчения исходных реагентов на структурные свойства LiFeO<sub>2</sub> керамики**  
Суржиков Анатолий Петрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [nns15@tpu.ru](mailto:nns15@tpu.ru) стр. 92

Сотникова Анна Сергеевна, 2 курс  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет  
**Эпитаксиально-диффузионная технология получения эпитаксиально-диффузионная технология получения компенсированных слоев для лавинных S-диодов компенсированных слоев для лавинных S-диодов**  
Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [anyutakurasova@mail.ru](mailto:anyutakurasova@mail.ru) стр. 93

Трофимов Михаил Сергеевич, аспирант 1 года обучения, м.н.с.  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет  
**Механизмы протекания тока в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом при воздействии синхротронного излучения рентгеновского диапазона спектра**  
Толбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [mihant1999@yandex.ru](mailto:mihant1999@yandex.ru) стр. 94

Юшков Иван Дмитриевич, аспирант 2 года обучения  
Новосибирск, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, аспирантура  
**Мемристоры на основе германосиликатных стёкл**  
Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [ivanjushkov@gmail.com](mailto:ivanjushkov@gmail.com) стр. 95

## Фотоэлектрические характеристики гексагонального оксида галлия

Алмаев Дмитрий Александрович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Алмаев Алексей Викторович, к.ф.-м.н.

[almaev001@mail.ru](mailto:almaev001@mail.ru)

Солнечно-слепые (длина волны  $\lambda = 200\text{--}280$  нм) ультрафиолетовые (УФ) детекторы используются для беспроводной связи, обнаружения пламени, мониторинга озоновых дыр, химического и биологического анализа. Традиционные полупроводники не удовлетворяют современным требованиям и ведутся активные исследования перспективных материалов, таких как  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , который подходит для высокотемпературных и высокоомощных применений. На сегодняшний день наиболее изученным является стабильный  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  [1-3], в связи с этим, интерес вызывает исследование фотоэлектрических характеристик метастабильного  $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$ .

Пленки  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  были получены ООО «Совершенные кристаллы» методом хлоридной газовой эпитаксии (HVPE) на сапфировых подложках при температуре  $500^\circ\text{C}$ . Толщина пленок определена по изображению скола с использованием сканирующего электронного микроскопа КУКУ-ЕМ6900 при ускоряющем напряжении 20 кВ и составила 3,5–3,7 мкм. Фазовый состав образцов исследовался методом рентгенодифракционного анализа, с использованием дифрактометра высокого разрешения (ДРОН-6) с источником  $\text{CuK}_\alpha$  излучения ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) в режиме  $\theta\text{--}2\theta$  сканирования. На полученных дифрактограммах были обнаружены пики от поликристаллического гексагонального  $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$ . Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) и временных зависимостей тока ( $I$ ) в темновых условиях и при облучении светом проводились при помощи микрондовой установки фирмы Nextron и источника-измерителя Keithley 2636A. В качестве источника монохроматического ( $\lambda = 254$  нм) излучения была использована криптон-фторовая лампа с плотностью потока излучения  $620 \text{ мВт/см}^2$ . Методика измерения спектральных зависимостей внешней квантовой эффективности (EQE) и коэффициента пропускания ( $T$ ) подробно описана в работе [4].

ВАХ (рис. 1) показали степенную зависимость  $I$  от напряженности ( $E$ ),  $I \sim E^m$ , где  $m$  – показатель степени. Значения  $m$  для темнового тока ( $I_D$ ) и тока при освещении ( $I_L$ ) составили  $0,92 \pm 0,02$  и  $1,14 \pm 0,01$ , соответственно. Воздействие УФ излучения с  $\lambda = 254$  нм приводило к повышению  $m$ , за счет уменьшения потенциальных барьеров на границах зерен, характерных для поликристаллических структур. Быстродействие фотоприемников на основе  $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$  можно оценить по временным зависимостям  $I$  при циклическом воздействии светом (рис. 1). Значения нарастания и спада фотопроводимости составили  $1,05 \pm 0,03$  с и  $1,04 \pm 0,06$  с, соответственно, что указывает на равенство между темпом генерации и рекомбинации. Анализ спектра оптического пропускания (рис. 2) показал, что для пленок  $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$  характерны прямые оптические переходы, а значение оптической ширины запрещенной зоны ( $E_g^{\text{opt}}$ ) составило  $4,53 \pm 0,05$  эВ. На спектральной зависимости EQE (рис. 2) наблюдается максимум при  $\lambda = 274$  нм, что соответствует  $E_g^{\text{opt}}$ . Значение EQE при  $\lambda = 274$  нм и  $E = 1 \text{ кВ/см}$  составило  $1,7 \times 10^3 \%$ .

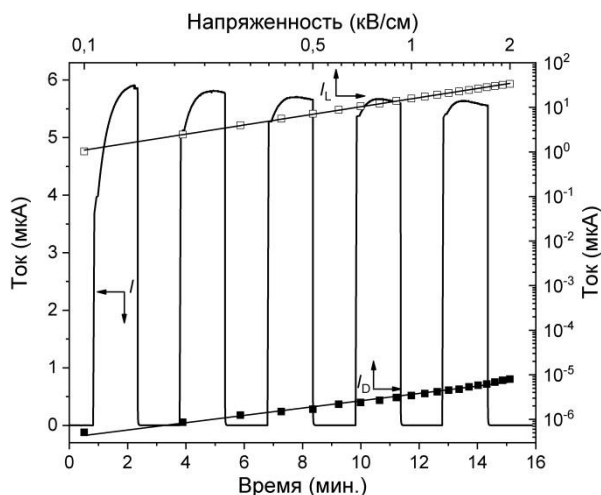


рис.1. ВАХ и временные зависимости тока

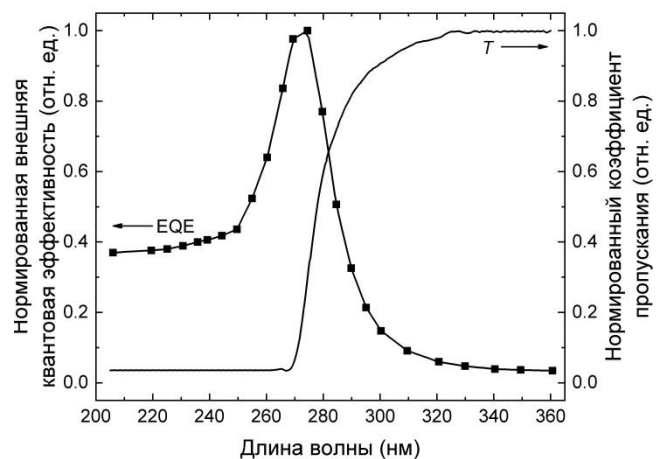


рис.2. Спектральные зависимости EQE и T

Значение EQE характеризует эффективность сбора фотоносителей [1-3], которую можно определить, как произведение внутренней квантовой эффективности (IQE) и коэффициента усиления ( $g$ ). Высокая фоточувствительность пленок  $\epsilon(\kappa)\text{-Ga}_2\text{O}_3$  обусловлена самолокализацией дырок, что приводит к квазиоднополярной фотопроводимости и значение  $g$  определяется как отношение времени жизни электронов ( $\tau_n$ ) к времени их пролета между контактами. Большое  $\tau_n$  позволяет электронам несколько раз проходить через электрическую цепь и играет ключевую роль в усилении фототока [3]. Если пренебречь механизмами рассеяния

и считать, что генерация фотоносителей в объеме много больше генерации на поверхности, то значения IQE можно принять равными нормированным EQE. В этом случае значение  $g$  составляет 17 отн. ед.

В данной работе были исследованы фотоэлектрические характеристики пленок  $\epsilon(\kappa)$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  толщиной 3,5-3,7 мкм, полученных методом HVPE на сапфировых подложках. ВАХ показали степенную зависимость, а по временным зависимостям тока оценено быстродействие фотоприемников. Анализ спектра оптического пропускания позволил определить характер оптических переходов и рассчитать значение оптической ширины запрещенной зоны, которое согласуется со спектральным максимумом фоточувствительности. Описан механизм внутреннего усиления фототока в таких структурах и оценен коэффициент усиления.

Исследования выполнены при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.).

Список публикаций:

[1] Hou X., Zou Y., Ding M., Qin Y. [et al] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. P. 80.

[2] Kaur D., Kumar M. // *Adv. Optical Mater.* 2021. P. 34.

[3] Chen X., Ren F., Gu S., Ye J. // *Photonics Research*. 2019. P. 381-415.

[4] Almaev A., Nikolaev V., Kopyev V., Shapenko S. [et al] // *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23, № 17. P. 19245–19255.

## Запасенная и эффективная энергия в твердом растворе

### $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$

Бобылев Вячеслав Александрович

Волков Дмитрий Вячеславович

Южный федеральный университет

Вербенко Илья Александрович, д.ф.-м.н.

[slava\\_bobelev@mail.ru](mailto:slava_bobelev@mail.ru)

Пьезокерамики на основе свинцосодержащих соединений является широко используемыми материалами для применений в различных пьезоэлектрических устройствах, таких как: датчики деформации и давления [1-2], устройства для накопления энергии [2-4] и хранения информации [2]. В данной работе представлены результаты изучения поляризационных свойств твердых растворов квазибинарного сечения  $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$  трехкомпонентной системы  $\text{BaTiO}_3$ - $\text{BaZrO}_3$ - $\text{AgNbO}_3$ . Наибольший интерес для исследования и дальнейшего применения в качестве основы ёмкостных элементов, представляет интервал концентраций  $\text{AgNbO}_3$ ,  $0,00 \leq x \leq 0,03$ . Результаты ранее проведенных исследований [5] показали, что сосуществование фаз антисегнетоэлектрической (AFE) и сегнетоэлектрической (FE) в материале может повысить плотность запасаемой энергии.

Керамики  $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$  ( $x = 0,03; 0,06; 0,09$ ) были получены методом двухстадийного твердофазного синтеза, с использованием прекурсоров при  $T_1 = 1593$  К,  $t = 4$  ч. и  $T_2 = 1623$  К,  $t = 6$  ч. Прекурсоры  $\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3$  и  $\text{AgNbO}_3$  получали при  $T_1 = 1593$  К,  $t = 4$  ч.,  $T_2 = 1723$  К,  $t = 6$  ч, и  $T_1 = 1173$  К,  $t = 4$  ч., соответственно. Перед спеканием выполняли процедуру механоактивации на протяжении 20 мин (1800 об/мин). Последующее спекание проводили при  $T_{\text{сп}} = 1643$  К,  $t = 2$  ч.

Петли диэлектрического гистерезиса для твердых растворов  $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$  ( $x = 0,03, 0,06, 0,09$ ), при напряженности электрического поля равной 35 кВ/см, для каждого исследуемого образца, не достигают насыщения, это видно из рисунка. Приложение более высокого поля неизбежно приводило к диэлектрическому пробою образца.

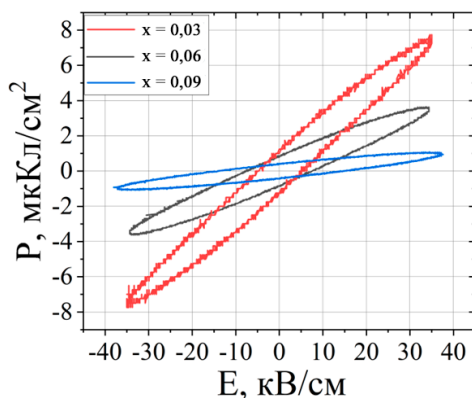


рис.1 Петли диэлектрического гистерезиса твердых растворов  $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3-x\text{AgNbO}_3$  ( $x = 0,03, x = 0,06, x = 0,09$ )

Наибольшее значение КПД и эффективной энергии наблюдается у образца с  $x = 0,03$ . Самое малое значение КПД и эффективной энергии наблюдается у образца с  $x = 0,09$ . Наибольший интерес для исследования и дальнейшего применения в качестве основы нелинейных управляемых ёмкостных элементов представляют твердые растворы  $(1-x)\text{BaTi}_{0,8}\text{Zr}_{0,2}\text{O}_3 + x\text{AgNbO}_3$ , с концентрациями  $x \leq 0,03$ . В этом диапазоне концентраций  $\text{AgNbO}_3$  ожидается наибольшее значение запасенной энергии и КПД. В дальнейших исследованиях планируется улучшить электрическую прочность образцов, для достижения полей насыщения.

По полученным результатам можно установить, что при небольших концентрациях (меньше 0,03)  $\text{AgNbO}_3$ , с AFE фазой, наблюдаются максимальные значения КПД и запасенной энергии. В дальнейшем планируется работа по улучшению электрической прочности материала, и исследование свойств в трехкомпонентной системе  $\text{BaTiO}_3\text{-BaZrO}_3\text{-NaNbO}_3$  и сравнение полученных результатов с системой  $\text{BaTiO}_3\text{-BaZrO}_3\text{-AgNbO}_3$ , с небольшими концентрациями AFE фазы ( $\text{NaNbO}_3$ ).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/ГЗ0110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

[1] Леманов В. В., Смирнова Е. П., Тараканов Е. А. // ФТТ. 1996. Т37. №8. С. 2476-2480.

[2] Яффе Б., Кук У., Яффе Г // Мир. 1974. С. 288.

[3] Ивлиев М.П., Раевский И.П., Резниченко Л.А. и др. // ФТТ. 2003. Т. 45. №10. С. 1886-1891.

[4] Раевский И.П., Ивлиев М.П., Резниченко Л.А. // ЖТФ. 2002. Т. 72. №6. С. 120-124.

[5] Zhiyong Liu, Jinshan Lu, Yuqing Mao, Pengrong Ren, Huiqing Fan // Journal of the European Ceramic Society. 2018. V. 38. P. 4939–4945.

## **Электрофизические свойства блочных полиуретанов, модифицированных металлокомплексами**

**Васильев Владислав**

**Ли Чжэн**

**Казанский (Приволжский) федеральный университет**

*Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.*

*[vlad.v99@bk.ru](mailto:vlad.v99@bk.ru)*

Соединение нескольких полимерных блоков различной химической природы в единую макромолекулу позволяет получать блок-сополимеры, уникально сочетающие в себе свойства составляющих их мономеров. Блок-сополимеры достаточно перспективны для мембран, так как их свойства во многом определяются их морфологией, которая зависит от степени полимеризации каждого сегмента, молекулярной массы, полидисперсности (распределения частиц по размерам или массам в зависимости от способа измельчения) сополимера и взаимодействия между сегментами. БС состоят из гибкой цепной составляющей (состоящей из трех блоков), которая является амфифильной. Два крайних блока одинаковые, это – полиоксиэтиленгликоль (гидрофильный), а центральный блок гидрофобный. Это в свою очередь приводит к фазовой сегрегации. Жесткий блок является копланарным и образует структуры размерностью до 80–100 ангстрем. Такие блоки объединяются в структуры, в которых каркасом являются жесткие блоки, а гибкие блоки находятся как внутри, так и вне пустот, образованных жестким каркасом. В зависимости от расположения гибких блоков и размерности жесткого каркаса меняются свойства получаемых матриц. Модификаторы в виде металлокомплексов влияют на расположение жестких блоков и на процессы объединения гибкой составляющей.

Нами исследовались две серии пленочных материалов, относящихся к сегментированным полиуретанам, модифицированным координационными соединениями меди. Образцы синтезированы на кафедре технологии синтетического каучука КНИТУ (КХТИ). В качестве носителя ионов металла в одной серии использован  $\text{Cu(II)}$ -координированный полиоксиэтилензамещенный кремнезем  $\text{ASiP-Cu-0,5}$  (с содержанием 0,5 %  $\text{CuCl}_2$ ), а в другой – система  $\text{CuCl}_2$ -диэтилгидроксиламин ( $\text{Cu-ДЭГА}$ ) в отношении 1:1. Внутри каждой серии образцы отличаются количеством введенного модификатора, содержание которого изменялось от 0,01 до 2 масс. %. Также для сравнения проводились измерения для образцов, модифицированных хлоридом меди  $\text{CuCl}_2$ , который используется при синтезе сложных металлокомплексов обеих серий.

Температурная зависимость электрических свойств образцов полимеров (толщиной 0,5-0,7 мм) регистрировалась в диапазоне температур от  $-160^\circ\text{C}$  до  $160^\circ\text{C}$  на частоте 1 кГц, через каждые  $2^\circ\text{C}$  с помощью измерителя иммитанса E7-20. Подобные исследования позволяют определить температуру стеклования ( $\alpha$ -перехода) полимера – по положению максимума диэлектрических потерь.

Полученные кривые температурной зависимости тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  позволяют сделать вывод о том, что у образцов нет явно выраженных пиков характеризующих сегментальную подвижность полимера в среднем диапазоне температур. Однако наблюдается характерный рост значений  $\text{tg } \delta$  с увеличением концентрации модификатора. В это же время для серии с модификатором ASiP-Cu диэлектрические потери оказались выше, чем у серии с Cu-ДЭГА при сходных концентрациях.

Образцы с добавлением ASiP-Cu показывают значительно большее значение емкости, особенно с повышением концентрации данного модификатора в полимерной структуре.

Результаты температурной зависимости сопротивления показали, что образцы с Cu-ДЭГА проявляют более высокое электрическое сопротивление. При том с повышением концентрации модификаторов сопротивление падает, сохраняя преимущественный рост для Cu-ДЭГА.

Общей чертой данных образцов является низкая термическая устойчивость и пики в диапазонах низких температур. Исходя из этого, в данной работе было проведено сравнение результатов не только всей серии образцов с различными концентрациями, но также и сравнение электрических характеристик при повторных измерениях для подбора оптимальной температуры и исследования деградации свойств полимерной матрицы.

## **Мемристорная память на основе оксидов и нитридов кремния**

*Гисматулин Андрей Андреевич*

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН*

*[aagismatulin@isp.nsc.ru](mailto:aagismatulin@isp.nsc.ru)*

В настоящее время движущей силой в микроэлектронике является разработка универсальной памяти, которая сочетает в себе высокую скорость и бесконечное количество циклов перепрограммирования ОЗУ, энергонезависимость и высокую информационную емкость флэш-памяти, а также низкую стоимость жесткого диска. Одним из наиболее перспективных кандидатов на универсальное запоминающее устройство считается мемристор, основанный на обратимом переходе диэлектрической пленки из состояния с высоким сопротивлением в состояние с низким сопротивлением и обратно при подаче импульса тока. В настоящее время физика переключения резистивного элемента памяти из низкоомного состояния в высокоомное и обратно является предметом дискуссий и интенсивных исследований. Распространённой гипотезой является представление о том, что переключение резистивной памяти осуществляется за счет электродиффузии вакансий кислорода. Отсутствие ясного понимания физики механизмов транспорта заряда в мемристорах сдерживает разработку матриц памяти на их основе. Преимущество мемристоров на основе  $\text{SiN}_x$  и  $\text{SiO}_x$  перед другими диэлектриками заключается в том, что нитрид и оксид кремния совместимы с кремниевой технологией и широко используются в ней.

Изучались структуры  $p^{++}\text{-Si/SiN}_x/\text{Ni}$  и  $p^{++}\text{-Si/SiO}_x/\text{Ni}$ . Толщина слоя  $\text{SiN}_x$  составляла 32 нм, а  $\text{SiO}_x$  – 40 нм. Нестехиометрический нитрид и оксид кремния получены с помощью плазмохимического метода. Никелевый электрод получался с помощью магнетронного распыления. Площадь Ni электрода составляла  $0,5 \text{ мм}^2$  для измерения ВАХ, для определения максимально возможного количества циклов переключений мемристора был использован диаметр Ni электрода в 150 мкм.

Механизм переноса заряда мемристора на основе  $\text{SiN}_x$  и  $\text{SiO}_x$  во всех резистивных состояниях описывается током, ограниченным пространственным зарядом (ТОПЗ) [1-2].

На рис 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристора на основе  $\text{SiO}_{1,1}$  в исходном (И), низкоомном (НО), промежуточном(П) и высокоомном (ВО) состояниях. На ВАХ во всех состояниях выделены линейные участки, характерные для омической проводимости и квадратичные участки ТОПЗ. Были проведены измерения температурных зависимостей тока для мемристоров на основе плазмохимических нестехиометрических  $\text{SiO}_x$  и  $\text{SiN}_x$  и произведено сравнение с теоретическими кривыми модели ТОПЗ. Из сравнения экспериментальных данных и ТОПЗ, определены концентрация и энергии ионизации ловушек для мемристоров на основе плазмохимических нестехиометрических  $\text{SiO}_x$  и  $\text{SiN}_x$ .

Рис 2 показывает максимальное возможное количество циклов переключений для мемристоров на основе плазмохимического нестехиометрического  $\text{SiO}_{1,8}$ . Для циклирование были выбраны следующие параметры: напряжение включения ( $U_{\text{set}} = 5,4 \text{ В}$ ), напряжение выключения ( $U_{\text{reset}} = -8,8 \text{ В}$ ), напряжение чтения ( $U_{\text{read}} = 0,2 \text{ В}$ ), длительность импульса включения, выключения и чтения было принято за 10 мсек, задержка между импульсами 10 мсек.

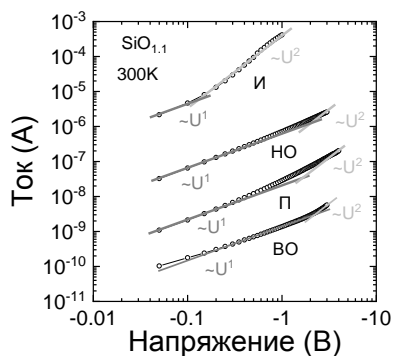


рис.1. ВАХ в разных состояниях (исходном, низкоомном, промежуточном и высокоомном) мемристора на основе  $\text{SiO}_{1,1}$

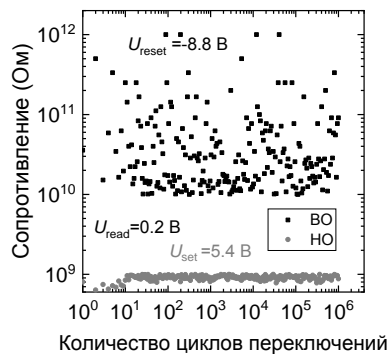


рис.2. Количество циклов переключений мемристора на основе  $\text{SiO}_{1,8}$

Исследования выполнены при поддержке РФФ гранта №22-19-00369.

Список публикаций:

- [1] N. F. Mott, R. W. Gurney, *J. Phys. Chem.*, 45, 7, 1142–1142 (1941).
- [2] M. A. Lampert, P. Mark, *Current injection in solids*, Academic Press, NY, USA, (1970)

## Анализ сближения ступеней при росте Si на Si (001) методом ДБОЭ в условиях сверхвысокого вакуума

*Дирко Владимир Владиславович*

*Бурнашов Андрей Андреевич, Гнеушев Анатолий Владимирович*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*  
[vovenmir@gmail.com](mailto:vovenmir@gmail.com)

Развитие ростовых эпитаксиальных методов существенно расширило получение полупроводниковых структур с заданными параметрами. Доминирующая часть полупроводниковой промышленности создается на кремниевых подложках с кристаллографической плоскостью (001). Важным преимуществом эпитаксиального синтеза является возможность управлять ростовыми факторами и тем самым влиять на процессы протекания электрического тока, величину диэлектрической проницаемости, ширину запрещенной зоны, подвижность носителей заряда и спектр электронных состояний, благодаря чему улучшаются характеристики существующих традиционных полупроводниковых приборов и создаются новые приборы на основе квантово-размерных структур. Важным обстоятельством формирования эпитаксиальных структур является определение кинетических процессов и состояние поверхности подложки при выборе технологических параметров, таких как температура подложки и угол разориентации кристаллографической плоскости. [1–2]. Поэтому для получения качественных структур важна правильная предэпитаксиальная подготовка пластин и полное понимание состояния поверхности при заданных режимах роста. Данные условия хорошо контролируются в методе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в условиях сверхвысокого вакуума. В методе МЛЭ реализуется метод дифракции быстрых отраженных электронов (ДБОЭ), который позволяет получить информацию о морфологии поверхности «in situ» [3].

В работе проводились эксперименты по росту Si на Si (001)±0,05° со скоростью осаждения 0,09 МС/с в температурном интервале подложек от 200 до 800 °С. Предварительно пластины Si (001) проходили стандартную предэпитаксиальную подготовку и последующий высоковакуумного отжиг при температуре 1000 °С. Эпитаксиальный рост Si на Si (001) происходит с образованием чередующихся ступеней двух типов со сверхструктурами 1x2 и 2x1 [2]. Анализ поверхности методом ДБОЭ при росте Si в направлении [110] показал бимодальный характер колебаний интенсивности, зависящий от температуры подложки. Он заключается в том, что имеются два чередующихся максимума разной интенсивности, каждый из которых соответствует своему периоду колебаний.

Большой максимум интенсивности соответствует росту террасы  $T_B$  со сверхструктурной ориентацией 2x1, что соответствует расположению димерных рядов перпендикулярно краю ступеньки. Меньший максимум интенсивности соответствует росту  $T_A$ -террасы со сверхструктурной ориентацией 1x2, что соответствует расположению димерных рядов параллельно краю ступеньки [4]. При анализе поверхности в процессе роста методом ДБОЭ в направлении [100] наблюдались изменения интенсивности рефлексов от сверхструктур 1x2 и 2x1, лежащих в зоне Лауэ ~1/2, при изменении температуры роста.



Таким образом, в работе выявлена зависимость механизма роста Si на Si (001) от температуры. В интервале температур 200–500°C реализуется двумерный островковый механизм роста; при температурах роста 500 – 600°C наблюдается смешанный механизм роста; при температуре роста выше 600°C осуществляется рост по сдвигу ступеней. Полученные данные способствуют выбору параметров роста [5].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 23-62-10021.

Список публикаций:

[1] Izhnin I. I. et al. // *Applied Nanoscience* 2020, V. 10, P. 4375–4383.

[2] Izhnin I. I. et al. // *Opto-Electronics Review* 2018, V. 26, P. 195–200.

[3] Hafez, M. A. et al. // *Micron* 2022, V. 159, P. 103286.

[4] Esin M. Yu. et al. // *Semiconductors* 2018, V. 52, P. 390–393.

[5] Dirko V.V. et al. // *Nanotechnology* 2022, V. 33, P. 115603 (1–8).

## Диэлектрические характеристики твердых растворов тройной системы (1-x-y)BiFeO<sub>3</sub>-yBaTiO<sub>3</sub>-xPbTiO<sub>3</sub>

Есин Егор Сергеевич

Болдырев Никита Анатольевич

Южный федеральный университет

Болдырев Никита Анатольевич, к.ф.-м.н.

[esin@sfedu.ru](mailto:esin@sfedu.ru)

Одними из наиболее интенсивно изучаемых в последнее время материалов являются мультиферроики, в которых проявляется взаимодействие электрической и магнитной подсистем. Феррит висмута (BiFeO<sub>3</sub>, BF) – один из представителей данного класса материалов и благодаря высоким температурам фазовых переходов (температура Кюри,  $T_C$ , = 1083 К, температура Нееля,  $T_N$ , = 583 К) [1] часто рассматривается как основа для новых многофункциональных сред. Однако, широкому применению BF препятствует ряд технологических факторов, таких как зависимость его фазового состава и характеристик от условий получения, высокая электропроводность и т.д. Одним из решений данной проблемы может быть создание многокомпонентных твердых растворов (ТР) на его основе, что и стало целью настоящей работы.

Объектами исследования явились керамические образцы ТР тройной системы (1-x-y)BiFeO<sub>3</sub>-yBaTiO<sub>3</sub>-xPbTiO<sub>3</sub> с концентрациями в интервале  $0.05 \leq y \leq 0.15$  с шагом  $\Delta y = 0.025$  при  $x = 0.7$ . Керамику получали методом твердофазных реакций с последующим спеканием по традиционной керамической технологии. Порошки смеси прокаливали при 1173 К в течение 10 часов, затем, после вторичного измельчения – при 1123 К тоже в течение 10 часов. Процедура спекания проводилась при 1443 К.

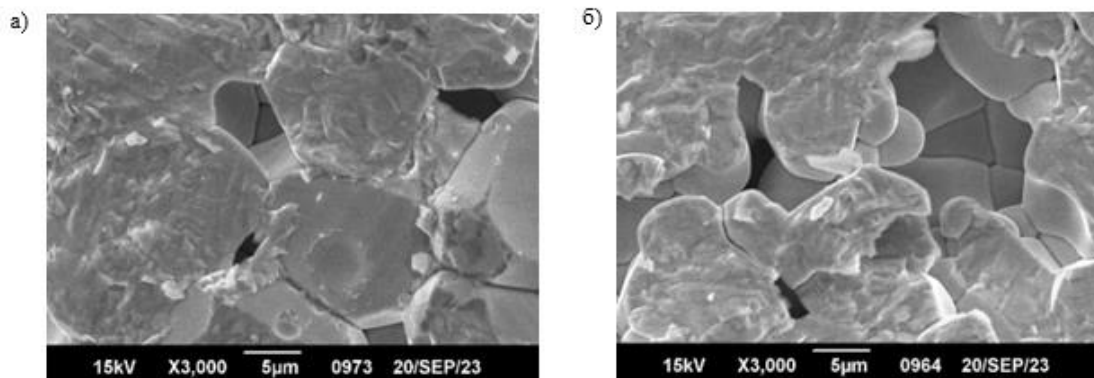


рис.1. Снимки микроструктуры для керамических образцов: а) 0.25BF-0.05BT-0.7PT и б) 0.15BF-0.15BT-0.7PT

На рис. 1 выведены микрофотографии зерновой структуры керамик: 0.25BF-0.05BT-0.7PT и 0.15BF-0.15BT-0.7PT. Во всех исследуемых керамиках формируется структура из кристаллитов, имеющих форму неправильных многогранников, а размер зерен при этом довольно сильно варьируется (5 – 15 мкм). Разрушения при скалывании керамики проходят при этом как по межзеренным границам, так и по самим зернам, что свидетельствует о близости их прочностей.

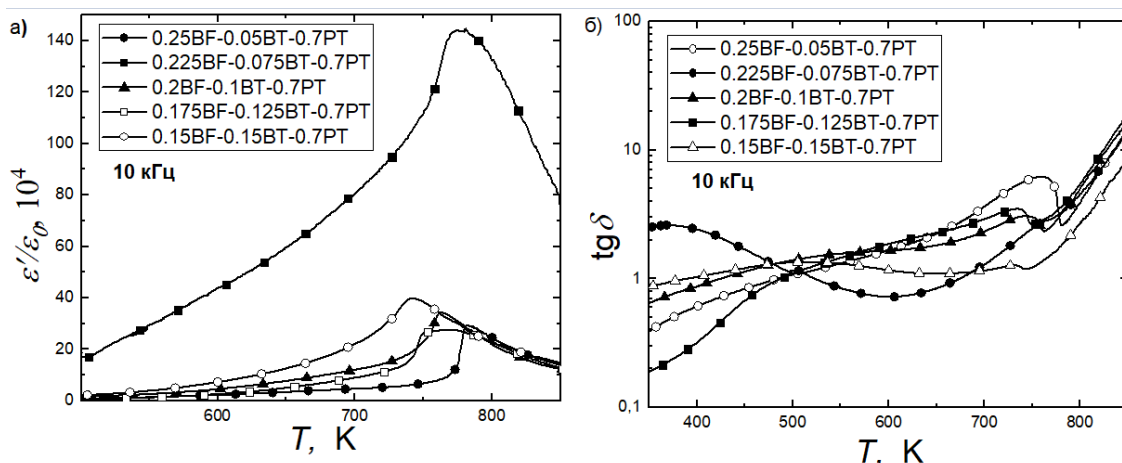


рис.2. Температурные зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) исследуемых образцов на частоте 10 ГГц

На рис. 2 представлены температурные зависимости  $\varepsilon'/\varepsilon_0$  и  $\text{tg}\delta$ . Из рисунка видно, что на зависимостях  $\varepsilon'/\varepsilon_0(T)$  в температурном диапазоне (700÷800) К формируется максимум, соответствующий фазовому переходу из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу. Причем температура максимума уменьшается при увеличении концентрации титаната бария. Также значения диэлектрической проницаемости для образца 0.225BF-0.075BT-0.7PT значительно выше, чем в других образцах. Причина данной аномалии диэлектрических характеристик станет предметом дальнейших исследований.

Полученные результаты могут быть использованы в разработке новых многокомпонентных мультиферроидных материалов на основе феррита висмута с высокими электрофизическими характеристиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности. Проект № FENW-2023-0010/Г30110/23-11-ИФ). Использовано оборудование Центра коллективного пользования НИИ физики Южного федерального университета «Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел».

Список публикаций:

[1] P. Fischer [et al.] // *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1980. Vol. 13 P.1931.

## Универсальная память: ожидания, реальность и перспективы

*Исламов Дамир Ревинирович*

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН*

*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет*

*[damir@isp.nsc.ru](mailto:damir@isp.nsc.ru)*

В компьютерах, ноутбуках, планшетах, смартфонах и других электронных гаджетах используется множество типов памяти для различных целей. В 1950-х годах биполярные транзисторы заменили электронные лампы. Затем каждые двадцать лет внедрялась новая технология электронной памяти. В 1970-х годах были изобретены интегральные схемы на основе кремния. На смену магнитной памяти пришла полупроводниковая оперативная память, появились компактные персональные компьютеры. В 1990-х годах появилась энергонезависимая флэш-память, сохраняющая информацию при отключении питания. Флэш-память заменила дискеты, CD, DVD и Blu-ray диски, жесткие диски и теперь широко используются в компьютерах, смартфонах и других устройствах в качестве твердотельных накопителей.

В настоящее время силами учёных и инженеров микроэлектроники активно разрабатывается универсальная память [1]. Такая память сочетает в себе лучшие качества статической и динамической оперативной памяти (высокая производительность, почти неограниченное количество циклов перезаписи), жестких дисков и флэш (энергонезависимость, высокая информационная ёмкость, низкая цена). Универсальная память потребует радикальной переработки компьютерной архитектуры. Такой компьютер включится мгновенно и продолжит работать как будто его и не выключали. Универсальная память станет основой концепции «вычисления-в-памяти», что крайне востребовано системами искусственного интеллекта.

На текущий момент есть несколько технологий-претендентов на универсальную память [2]. Основными из них являются резистивная коммутационная память, память с фазовым переходом, сегнетоэлектрическая память и магниторезистивная память. Недавно была представлена весьма многообещающая технология ULTRARAM для кандидата на роль универсальной памяти [3]. Она основана на резонансном туннелировании электрона между тремя энергетическими барьерами в квантовых ямах InAs/AlSb. Процесс туннелирования (перезаписи) происходит при приложении к структуре напряжения до 2,6 В, тогда как в отсутствие напряжения барьеры препятствуют прохождению электронов и удерживают их в ячейке без электропитания, что позволяет хранить записанные данные даже при комнатной температуре. Ожидается, что ULTRARAM без деградации выдерживает более  $10^7$  циклов со сроком хранения данных 1000 лет. ULTRARAM получила награду Best of Show Memory Technology Awards на саммите Flash Memory Summit в августе 2023 года. Стартап Quinas Technology в 2024 году собирается создать тестовые матрицы ULTRARAM, совместимые с 20-нм КМОП процессом.

В докладе обсуждаются преимущества различных технологий энергонезависимой памяти и насколько они близки к универсальной памяти. Рассматриваются преимущества различных технологий и причины их неготовности стать универсальной памятью. Обсуждаются решения актуальных проблем[4].

Список публикаций:

[1] Åkerman J., *Science* 308, 508 (2005).

[2] Kryder M. H., Kim C. S., *IEEE Trans. Magn.* 45, 3406 (2009).

[3] Tizno O. et al., *Sci. Rep.* 9, 8950 (2019).

[4] Silva J. P. B. et al., *APL Mater.* 11, 089201 (2023).

## Механизмы роста двумерных слоёв Ge на Si(100) при МЛЭ

*Кукенов Олжас Игоревич*

*Ворсин Олег Игоревич, Дюков Илья Юрьевич*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*Коханенко Андрей Павлович, д.ф.-м.н.*

*[okukenov@mail.ru](mailto:okukenov@mail.ru)*

Наноразмерные структуры за счёт проявления эффекта размерного квантования представляют большой интерес в области нанoeлектроники и нанофотоники. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет создавать наноструктуры с требуемыми размерами, резкими гетерограницами и минимальным количеством дефектов. При этом параметры наноструктур сильно зависят от условий роста и состояния поверхности. Поверхность Si(100) представляется в виде террас, которые неизбежно присутствуют на поверхности из-за разориентации плоскости среза с плоскостью [100] кристалла. Подложки Si(100) с малым углом разориентации ( $<1^\circ$ ) имеют высоту ступеней в один атомный слой, а чередующиеся террасы двух типов имеют сверхструктуру  $1 \times 2$  и  $2 \times 1$ , с длинными димерными рядами на всю ширину или длину террасы [1]. Атомы германия, попадая на террасу стремятся достигнуть её края и встроиться в ступень. При достаточной кинетической энергии атомы встраиваются в изломы следующей ступени и, таким образом, рост происходит за счёт сдвига ступеней. Если же кинетической энергии атомам не будет хватать до достижения края ступени или на своём пути они встретят другие атомы, начнут формироваться двумерные островки, постепенно заполняющие всю поверхность террасы и образуя следующую. Рассогласование кристаллических решёток Ge и Si в 4,2% приводит к тому, что первый слой в точности повторяет кристаллическую структуру подложки кремния, а последующие слои за счёт упругих напряжений имеют сверхструктуру  $2 \times N$ . Такая поверхность имеет короткие димерные ряды, длина которых также зависит от температуры. Рост смачивающего слоя происходит до наступления 3D роста, при котором квантовые точки начинают своё формирование. Для создания квантовых точек заданных размеров и плотности необходимо тщательно подбирать параметры роста [2]. Помимо скорости роста, температура поверхности играет решающую роль в механизмах формирования двумерных островков германия смачивающего слоя на поверхности Si(100). Целью работы является изучение влияния температуры на механизмы роста двумерных слоёв.

Эксперименты проводились на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100». Анализ состояния поверхности в процессе её формирования проводился методом дифракции быстрых отражённых электронов (ДБОЭ) в направлении [100] и [110] пучка электронов к подложке Si(100) (рис. 1). Исследования роста Ge со скоростью 0,02 МС/с проводились на подложках Si(100) с углом разориентации менее  $0,5^\circ$ .

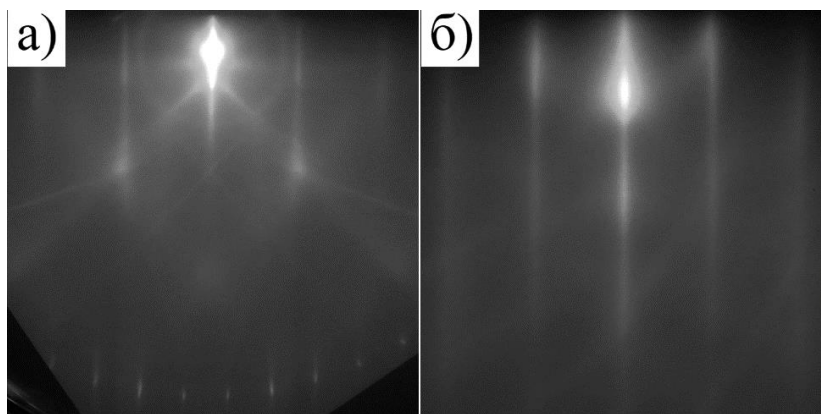


рис.1. Картины дифракции Si(100) в направлении а) [100] и б) [110]

В результате анализа картин ДБОЭ при синтезе Ge/Si(100) методом МЛЭ изучено влияние температуры на механизмы роста террас с параллельной и перпендикулярной ориентацией димерных рядов к ступени. Получены зависимости интенсивностей рефлексов 1x2 и 2x1 от температуры. Обнаружено, что при увеличении температуры происходит переход от двумерно-островкового роста к росту по механизму сдвигов ступеней.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 23-62-10021.

Список публикаций:

[1] Hervieu Yu. Yu. // *Russian Physics Journal*. 2020. V. 63. № 6. P.901–906.

[2] Арапкина Л. В., Юрьев В. А. // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180. № 3. С. 289–302.

**Зонная структура Cu<sub>2</sub>S**  
**Латыпова Айназ Рамзиловна**  
 Уфимский университет науки и технологий  
 Давлетишина Алиса Данисовна, к.ф.-м.н.  
[ainazlatypova@gmail.com](mailto:ainazlatypova@gmail.com)

Халькогениды меди проявляют высокую ионную проводимость наряду с преобладающей электронной проводимостью, что обуславливает их широкое применение в качестве рабочих элементов различных полупроводниковых устройств (термогенераторы, катодные материалы и т.д.).

Расчет зонной структуры Cu<sub>2</sub>S в тетрагональной фазе  $I\bar{4}2d$  был выполнен с помощью программы BIOVIA Materials Studio DMol<sup>3</sup>, которая основана на применении теории функционала электронной плотности [1]. При расчете данные для кристаллической структуры были использованы из базы данных Materials Project [2].

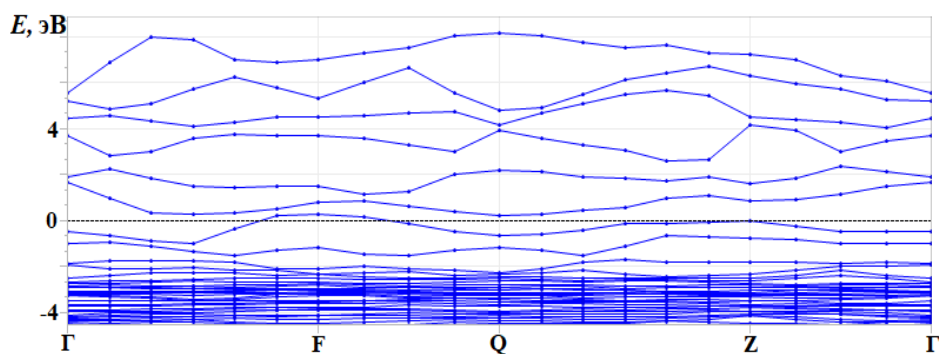


рис.1. Зонная структура Cu<sub>2</sub>S

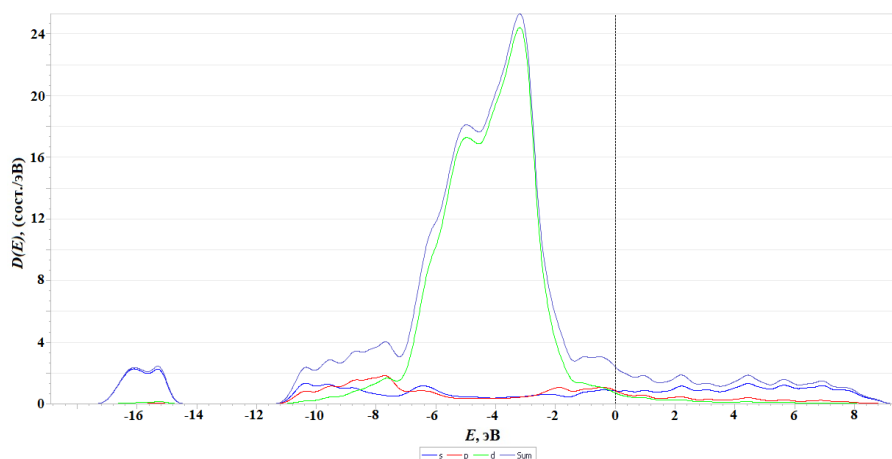


рис.2. Плотность электронных состояний  $\text{Cu}_2\text{S}$

Анализ полученных результатов расчета зонной структуры (рис. 1) и плотности состояний (рис. 2) показывает сложный гибридный характер энергетических уровней. Уровень Ферми соответствует 0 эВ. Наибольшая плотность энергетических уровней наблюдается для интервала от -6,5 до -2 эВ, в которую преимущественный вклад оказывают d-состояния катионов меди. Около уровня Ферми с наибольшей вероятностью расположены p-электроны серы и d-электроны меди.

На основе расчета зонной структуры сульфида меди  $\text{Cu}_2\text{S}$  можно сделать вывод, что данное соединение имеет зонную структуру, характерную для металлов.

Список публикаций:

[1] <https://biovia-materials-studio-2017.updatestar.com/>

[2] <https://materialsproject.org/>

## Термическая устойчивость сегментированных полиуретанов, модифицированных координационными соединениями меди

Ли Чжэн

Васильев Владислав

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Болтакова Наталья Викторовна, к.ф.-м.н.

[czenli01@gmail.com](mailto:czenli01@gmail.com)

Полиуретаны (ПУ) представляют собой широкий класс соединений, позволяющих создавать материалы с улучшенными эксплуатационными свойствами, такими как прочность, твердость, упругость, стойкость к истиранию, растворителям, температурным перепадам и др. Изменяя химический состав и концентрацию исходных компонентов можно варьировать эти показатели в широком интервале и получать материалы с абсолютно противоположными свойствами. Одним из способов влияния на химическое строение и морфологию ПУ является использование в процессе их синтеза координационных соединений переходных металлов. Установлено, что такие соединения приводят к образованию стопочных структур, в которых возможен перенос электронов сквозь стопки. Причем возможно это только при использовании металлов, способных существовать в двух различных степенях окисления. Это могут быть ионы меди, железа, ванадия, молибдена. Путем подбора металла, типа металлокомплекса (МК) и полимерной группы, связывающей его в структуре ПУ, можно получать широкий по электрической проводимости ряд материалов – вплоть до полупроводниковых.

Нами исследовались две серии пленочных материалов, относящихся к сегментированным (обладающим некой пространственной структурой из жестко связанных блоков, соединённых между собой гибкими цепями) ПУ, модифицированным координационными соединениями меди. Образцы синтезированы на кафедре технологии синтетического каучука КНИТУ (КХТИ) на основе композиции политетрагидрофурана, метиленидифенилдиизоцианат и 1,4-бутандиола в соотношении 1:2:1 соответственно. В качестве носителя ионов металла (меди) в одной серии использован чистый  $\text{CuCl}_2$ , а в другой – система  $\text{CuCl}_2$ -диэтилгидроксиламин (Cu-ДЭГА) в отношении 1:1. Внутри серии образцы отличаются количеством введенного модификатора, содержание которого изменялось от 0,01 до 2 масс. %. Также для сравнения проводились измерения для образца, состоящего только из полиуретановой матрицы без добавления МК.

Основной проблемой металлоординированных ПУ (МКПУ) является их пониженная термостабильность. Нашей задачей было исследование влияния циклов нагревания-охлаждения (ЦНО) на электрофизические свойства исследуемых пленок. Температурная зависимость электрических свойств образцов полимеров (толщиной 0,5-0,7 мм) регистрировалась в диапазоне температур от  $-120$  до  $160^{\circ}\text{C}$  на частоте  $1$  кГц. Измерения проводились с помощью измерителя иммитанса E7-20 на фоне снижения температуры образца, показания снимались через каждые  $2^{\circ}\text{C}$ . Для каждого образца проведено по два цикла измерения.

Проведенные исследования показали, что добавление МК значительно улучшает термостойкость полимерной основы. В то время как образцы с добавками модификаторов выдержали два цикла нагрева-охлаждения в диапазоне от  $-120$  до  $160^{\circ}\text{C}$ , контрольный образец плавился при нагревании до столь высоких температур. Поэтому для него верхний предел температур был снижен до  $60^{\circ}\text{C}$ .

Анализ результатов позволяет сделать выводы о том, повторный ЦНО приводит к снижению диэлектрических потерь для контрольного образца и образца, модифицированного хлоридом меди. МКПУ со сложным модификатором Cu-ДЭГА наоборот – показали рост диэлектрических потерь при повторном ЦНО. Оба модифицированных образца показали смещение пика в сторону более высоких температур, положение пика контрольного образца не изменилось.

В целом величина диэлектрических потерь максимальная для образца, приготовленного с применением чистого  $\text{CuCl}_2$ , что объясняется большей концентрацией ионов меди в полимере. Меньшая величина потерь в образце с Cu-ДЭГА по сравнению с контрольным может быть объяснена более сильными отличиями в морфологии внутренней структуры, обусловленные введением этого модификатора. В пользу данного предположения также говорят форма и положение пиков. Кривые для контрольного образца и с  $\text{CuCl}_2$  имеют схожую форму, величину эффекта, положение, начало пиков приходится практически на одни и те же значения температуры ( $18-22^{\circ}\text{C}$ ). Пик для образца с Cu-ДЭГА не такой выраженный, более пологий и смещен в область положительных значений температуры.

Исследования образцов рассматриваемых серий продолжаются и их данные требуют более тщательного анализа. Положение наблюдаемых пиков соответствует интервалам стеклования ПУ, но предстоит уточнить наличие пиков в более низкотемпературном интервале.

## **Влияние сегнетоэлектрических доменных стенок на анизотропию инжекции заряда в монокристаллах $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$**

***Мельников Семён Алексеевич***

*Кособоков Михаил Сергеевич, Мельников Семён Алексеевич, Турыгин Антон Павлович,*

*Шур Владимир Яковлевич, Аликин Денис Олегович*

*Институт естественных наук и математики*

*Уральский федеральный университет*

*Кособоков Михаил Сергеевич*

*[semen.melnikov@urfu.me](mailto:semen.melnikov@urfu.me)*

Доменные стенки в сегнетоэлектриках обладают уникальными функциональными свойствами, существенно отличающимися от объемных свойств материала [1,2]. Например, они имеют на несколько порядков более высокую электропроводность и могут быть созданы или изменены в материале при помощи внешнего электрического поля. Электрические свойства доменных стенок определяются их топологией, зависят от свойств сегнетоэлектрика и материалов электродов, используемых для переключения поляризации [3-5]. В настоящее время фундаментальные исследования переходят на стадию разработки устройств на основе доменных стенок, однако до сих пор нет полного понимания свойств заряженных доменных стенок и механизмов их движения.

В данной работе экспериментально и теоретически исследовалась диффузия заряда по поверхности кристалла на неполярном Y-срезе монокристалла ниобата лития, легированного магнием ( $\text{MgO}:\text{LN}$ ), в присутствии доменных стенок, сформированных при локальном переключении поляризации зондом сканирующего зондового микроскопа. Распределение и релаксация поверхностного потенциала вблизи доменов исследовалась при помощи метода зонда Кельвина в течение 12 часов после переключения поляризации (рис. 1). Полученные на эксперименте данные о распределении поверхностного потенциала были использованы для расчёта распределения поверхностного заряда при помощи численного решения обратной физической задачи и анализа параметров диффузии поверхностного заряда.



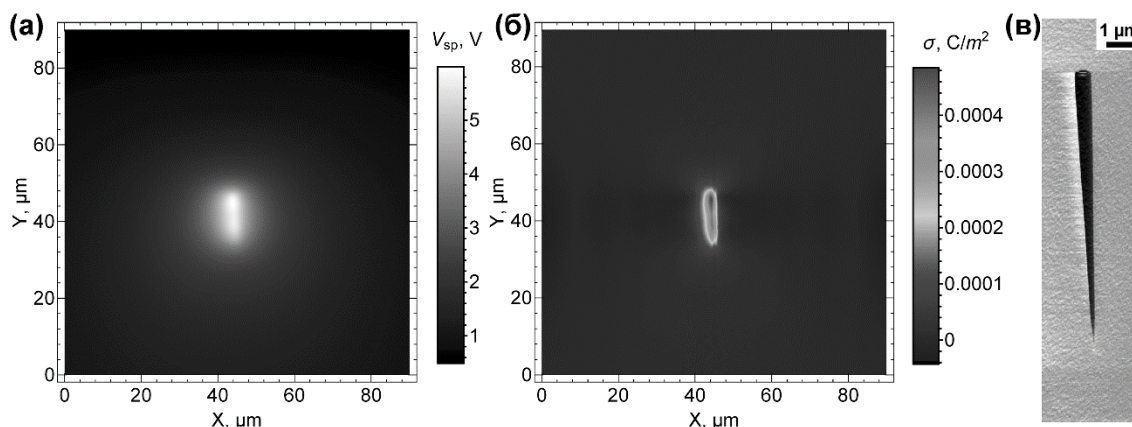


рис.1. а) Распределение поверхностного потенциала, измеренное методом зонда Кельвина по истечению 52 минут после приложения напряжения +100 В в течении 10 с, б) численно рассчитанное распределение плотности поверхностного заряда, в) типичная форма и размер домена, возникающего после приложения +100 В в течении 10 с. Неполярный срез кристалла MgO:LN.

Благодарность:

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант 23-72-01074) с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ (рег.№ 2968).

Список публикаций:

- [1] Eliseev E.A. et al. // *Phys. Rev. B*. 2011. Т. 83. С. 235313.
- [2] Shur V.Y. et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Т. 103. С. 102905.
- [3] Qian Y. et al. // *Phys. Rev. Appl.* 2022. Т. 17. С. 044011.
- [4] Meier D. and Selbach S.M. // *Nat. Rev. Mater.* 2021. Т. 7. С. 157-173.
- [5] McConville J.P. V. et al. // *Adv. Funct. Mater.* 2020. Т. 30. С. 2000109.

## Применение III-нитридов для создания светоизлучающих приборов в видимой и ультрафиолетовой областях спектра и СВЧ-транзисторов

**Осинных Игорь Васильевич**

*Институт физики полупроводников СО РАН*

*[igor-osinnykh@isp.nsc.ru](mailto:igor-osinnykh@isp.nsc.ru)*

Нитриды металлов III группы и их твердые растворы являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны, покрывающей широкий диапазон от 0.7 эВ для InN до 6.1 эВ для AlN, что соответствует диапазону длин волн 200-1770 нм. Поэтому эти материалы нашли своё воплощение на практике в создании светоизлучающих приборов, излучающих во всей видимой и ультрафиолетовой областях спектра [1,2]. Развитие технологии A3-нитридных полупроводников увенчалось присуждением Нобелевской премии по физике 2014 года японским ученым Исаму Акасаки, Хироси Аmano, Суджи Накамура за разработку голубых оптических диодов на основе InGaN/GaN гетероструктур, позволивших внедрить яркие и энергосберегающие источники света, что подчеркивает важность данного материала. Дальнейшие перспективы нитридной оптоэлектроники связаны с продвижением в фиолетовую и зеленую области спектра, созданием высокоэффективных светодиодов и лазеров, источников одиночных фотонов, работающих при комнатной температуре.

Нитриды металлов III группы также востребованы на рынке мощной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники: в последние годы растет доля транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе AlGaIn/GaN гетероструктур с двумерным электронным газом (2DEG), которые вытесняют аналогичные приборы, созданные на основе Si и GaAs [3,4]. Большая ширина запрещенной зоны III-нитридов является основным преимуществом гетероструктур, поскольку это позволяет достигать высоких значений рабочих и пробивных напряжений в устройствах на основе III-нитридов. Помимо этого III-нитриды характеризуются спонтанной и пьезоэлектрической поляризациями, которые в свою очередь обеспечивают высокую концентрацию двумерного электронного газа (2DEG) возле гетерограницы  $>10^{13} \text{ см}^{-2}$  в AlGaIn/GaN гетероструктурах. Высокая плотность носителей заряда в HEMT обеспечивает большие плотности тока, что в сочетании с высоким напряжением пробоя и высокой теплопроводностью позволяет достичь высокой плотности мощности.

В настоящем обзоре освещены результаты по применению III-нитридов в оптоэлектронике и СВЧ-электронике как на мировом, так и на российском уровне.

Список публикаций:

- [1] Jones K., Chow T., Wraback M., Shatalov M., Sitar Z., Shahedipour F., Udway K., and Tompa G. // *J. Mater. Sci.* 2015. V.50, P. 3267.
- [2] Tsao J. Y., Chowdhury S., Hollis M. A., Jena D., Johnson N. M., Jones K. A., Kaplar R. J., Rajan S., Van De Walle C. G., Bellotti E., Chua C. L., Collazo R., Coltrin M. E., Cooper J. A., Evans K. R., Graham S., Grotjohn T. A., Heller E. R., Higashiwaki M., Islam M. S., and Simmons J. A. // *Adv. Electron. Mater.* 2018. V. 4, P. 1600501.
- [3] Dalapati P., Urata S., Egawa T. // *Superlattices and Microstructures.* 2020. V. 147, P. 106709.
- [4] Chen K. J., Haberland O., Lidow A., Tsai C. lin, Ueda T., Uemoto Y., Wu Y. // *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2017. V. 64. №. 3. P. 779.

## **Эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов в ансамбле коллоидных наноплателетов CdSe/CdS**

**Смирнова Ольга Олеговна**

*Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе*

*Родина Анна Валерьевна*

*[Smirnova.olga@mail.ioffe.ru](mailto:Smirnova.olga@mail.ioffe.ru)*

Коллоидные полупроводниковые наноплателеты (квазидвумерные нанопластинки) — яркий пример объектов, свойства которых в значительной степени обуславливаются сильным размерным квантованием носителей заряда. Так, положение пиков в спектре фотолюминесценции (ФЛ) зависит от размеров нанокристаллов, их формы и состава. Благодаря относительной легкости синтеза и широким возможностям управления свойствами они находят применение в таких областях, как оптоэлектроника, спинтроника, фотовольтаика и биология [1]. В ансамбле наноплателетов с оболочкой CdSe/CdS впервые для таких объектов наблюдались эффекты оптического выстраивания и оптической ориентации экситонов – появления линейной или циркулярной поляризации фотолюминесценции при облучении линейно или циркулярно поляризованным светом, соответственно [2].

В работе представлено теоретическое описание исследуемых эффектов в случае импульсного и постоянного возбуждения линейно или циркулярно поляризованным светом. При низкой температуре достаточно рассматривать пары нижних по энергии уровней светлого и темного экситона с проекциями полного момента  $\pm 1$  и  $\pm 2$  на ось квантования, соответственно. Внутренние анизотропные расщепления состояний светлого и темного экситона, характерные времена релаксации между состояниями и времена жизни спина можно оценить из зависимости эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации от магнитного поля в геометрии Фарадея. Для определения диапазонов значений указанных параметров были также проанализированы зависимости асимптотической скорости распада интенсивности ФЛ от температуры и магнитного поля.

Временные зависимости эффектов оптического выстраивания и оптической ориентации на временах порядка нескольких нс определяются вкладом состояний светлого экситона в ФЛ. Вклад темного экситона должен проявляться на больших временах в эффекте оптической ориентации с ростом магнитного поля. Его вклад в эффект оптического выстраивания на больших временах может наблюдаться в случае передачи линейной поляризации между состояниями светлого и темного экситона, что может быть вызвано анизотропным механизмом взаимодействия между состояниями. Роль такого возмущения может играть статическая или динамическая деформация, отличающаяся по направлениям за счет наличия анизотропии формы наноплателетов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00300.

Список публикаций:

- [1] Efron Al. L., Brus L. E. // *ACS Nano.* 2021. V. 15(4). P. 6192.
- [2] Smirnova O. O. et al. // *Nanomaterials.* 2023. V. 13(15). P. 2402.



## Влияние механического измельчения исходных реагентов на структурные свойства $\text{LiFeO}_2$ керамики

*Соловьев Никита Николаевич*

*Лысенко Елена Николаевна, Суржиков Анатолий Петрович, Власов Виталий Анатольевич,  
Малышев Андрей Владимирович*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Суржиков Анатолий Петрович*

*[nns15@tpu.ru](mailto:nns15@tpu.ru)*

Литийсодержащие высокотемпературные сорбенты  $\text{CO}_2$  вызвали значительный интерес благодаря их заметной способности улавливать  $\text{CO}_2$ , низким температурам регенерации, относительно высокой стабильности и экономической целесообразности [1].

В этой категории внимание исследователей привлекли ферриты и оксиды металлов. Оксиды металлов обычно образуют карбонаты металлов при реакции с  $\text{CO}_2$ , которые разлагаются при высоких температурах с образованием  $\text{CO}_2$  в чистой форме, регенерируя исходный оксид металла. Среди многих оксидов металлов оксиды железа ведут себя как потенциальные адсорбенты  $\text{CO}_2$ , которые можно несколько раз карбонизировать и регенерировать. Этот процесс становится намного более эффективным при разработке адсорбентов с большой площадью поверхности и микропор [2]. Микроструктура ферритов влияет на их адсорбционные свойства. Поэтому формирование оптимальной микроструктуры в процессе спекания имеет решающее значение для получения ферритов с желаемыми свойствами.

Методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии исследовано влияние предварительного механического измельчения смеси исходных реагентов  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$  на структурные свойства литиевой ферритовой керамики химического состава  $\text{LiFeO}_2$ . Для этого исследовались два типа образцов: ферриты, синтезированные из порошковой смеси, предварительно смешанной в ступке (образцы №1) и механически измельченной в шаровой мельнице АГО-2С (стальные стаканы и шары) при скорости вращения стаканов 2220 об/мин и времени 60 мин (образцы №2). Синтез ферритовых образцов осуществлялся в лабораторной печи при  $1050^\circ\text{C}$  в течение 1 часа.

Рентгенофазовый анализ (РФА) был выполнен на дифрактометре ARL X'TRA. Для полнопрофильного анализа рентгенограмм использовалось программное обеспечение PowderCell 2.4. Идентификация фаз проводилась с использованием базы данных порошков PDF-4+ Международного центра дифракционных данных (ICDD). Микроструктуру керамических образцов исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi TM-3000.

Данные рентгенофазового анализа, показали основное содержание в синтезированных образцах фазы  $\alpha\text{-LiFeO}_2$  (97.9% масс. и 93.9% масс. соответственно для образцов №1 и №2) с кубической решеткой. Анализ также показал наличие в обоих образцах небольшого количества фазы феррита лития  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  (2.1% масс. и 6.1% масс. для образцов №1 и №2), которая могла образоваться в результате взаимодействия синтезированного феррита  $\text{LiFeO}_2$  с оксидом железа. Большее количество данной фазы, наблюдаемой для образцов №2, предположительно связано с образованием во время синтеза избытков оксида железа за счет намола металлического железа во время механического измельчения и его окислением при нагреве.

Результаты СЭМ (рис. 1), показали существенное различие в плотности и пористости ферритовой керамики, полученной из порошков с различной предисторией. Более равномерная пористость по объему и высокая удельная поверхность наблюдаются для образцов, предварительно измельченных в мельнице. Полученная таким образом керамика представляет интерес для ее использования в качестве адсорбционного материала по оксидам углерода.

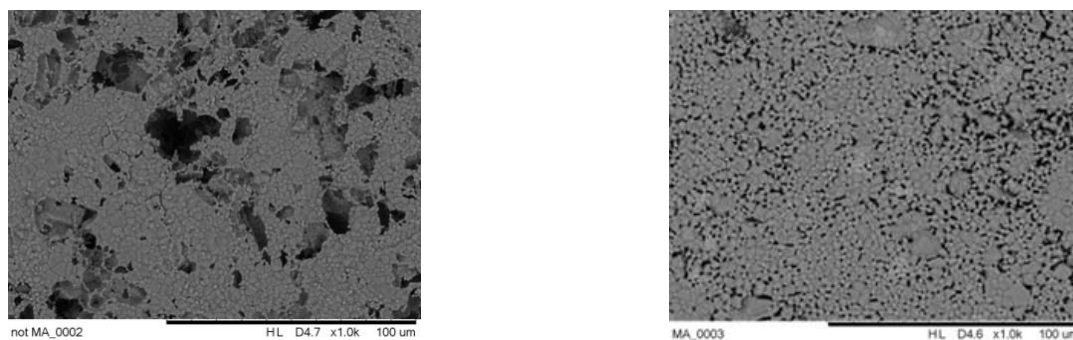


рис. 1 СЭМ изображения для ферритовых образцов №1 (а) и №2 (б)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSWW-2023-0011).

Список публикаций:

[1] Zhang, X., Buthiyappan, A., Jewaratnam, J. Bifunctional materials for integrated CO<sub>2</sub> capture and conversion: review on adsorbent and catalyst types, recent advances, and challenges // *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, Vol. 28, 111799.

[2] Agarwal, S., Mudoi, M., Singhal, S., Khichi, A., Dhyani, A. Ferrites and Fe oxides as effective materials for the removal of CO<sub>2</sub> // *Ferrite Nanostructured Magnetic Materials: Technologies and Applications*, 2023, P. 831-851.

## Эпитаксиально-диффузионная технология получения компенсированных слоев для лавинных S-диодов

Сотникова Анна Сергеевна

Томский государственный университет

Прудаев Илья Анатольевич, к.ф.-м.н.

[anyutakurasova@mail.ru](mailto:anyutakurasova@mail.ru)

Лавинный S-диод – полупроводниковый прибор, на вольт-амперной характеристике которого имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением S-типа. В настоящее время наиболее перспективными применениями S-диодов являются компактные генераторы коротких импульсов для оптических дальнометров, сверхширокополосных радаров и лидаров. В данной работе представлены результаты разработки и исследования эпитаксиально-диффузионной технологии изготовления структур для лавинных S-диодов. Целью исследования является определение оптимальной конструкции активной области прибора и определение условий ее изготовления.

Результаты технологических экспериментов показали, что диффузия в структуры первого типа позволяет, воспроизводимо изготавливать лавинные S-диоды, имеющие в составе активной области слои n- и p-типа проводимости. Высокие коэффициенты диффузии железа не позволяют контролируемо изготавливать подобные S-диоды из структур второго типа, активная область содержит один слой p-типа проводимости. Предварительные результаты исследования вольт-амперных характеристик лавинных S-диодов показали, что для обоих типов структур наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления S-типа. При этом статическое напряжение переключения составляет 40-60 В.

Измерения характеристик в схеме генерации импульсов тока (более 10 А) показали (рис.1), что S-диоды обоих типов имеют одинаковые напряжения переключения при низкой частоте 10кГц. При частоте 60кГц начинается снижение напряжения переключения, в 3 раза выше у S-диода с n- и p- типом проводимости, чем у диода с p-типом проводимости при этой частоте.

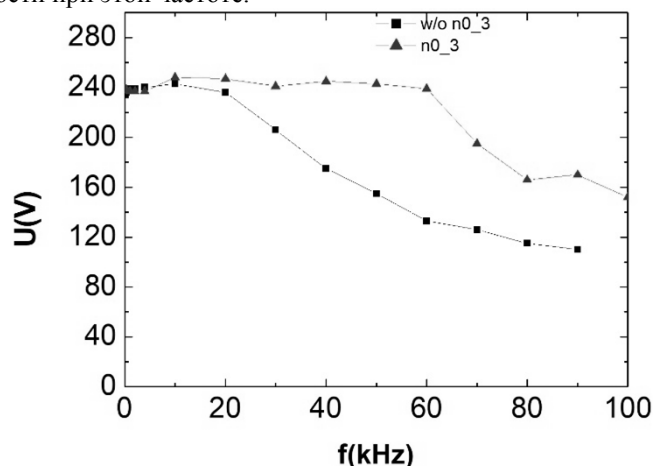


рис.1 – Частотная зависимость динамического напряжения переключения для S-диодов двух типов

Предварительные результаты исследования вольт-амперных характеристик лавинных S-диодов показали, что для обоих типов структур наблюдается участок отрицательного дифференциального сопротивления S-типа. При этом статическое напряжение переключения составляет 40-60 В.

# Механизмы протекания тока в детекторных структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом при воздействии синхротронного излучения рентгеновского диапазона спектра

Трофимов Михаил Сергеевич

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Голбанов Олег Петрович, д.ф.-м.н.

[mihant1999@yandex.ru](mailto:mihant1999@yandex.ru)

В настоящее время источники синхротронного излучения постепенно вытесняют рентгеновские трубки из научно-исследовательского инструментария и занимают лидирующую позицию в развитии современной науки и техники. Благодаря своим уникальным электрофизическим свойствам, синхротронное излучение является многопрофильным инструментом для проведения фундаментальных исследований в области медицины, микробиологии, материаловедения, микро-и нанoeлектроники, а также физики быстропротекающих процессов.

Для регистрации синхротронного излучения широко применяются детекторы ионизирующих излучений на основе полупроводниковых материалов, обладающие значительно лучшими спектрометрическими характеристиками по сравнению с газовыми и сцинтилляционными счетчиками. На сегодняшний день в качестве детекторного материала хорошо зарекомендовал себя арсенид галлия, компенсированный хромом (HR-GaAs:Cr, где HR - high resistivity).

Разработанная учеными из Томска технология компенсации GaAs n-типа проводимости хромом в процессе высокотемпературной диффузии, позволяет получать радиационно-стойкие HR-GaAs:Cr (HR – high resistivity) структуры с удельным сопротивлением порядка  $10^9$  Ом·см и толщиной активной области до 1 мм [1 - 3]. Как показали исследования за последние 20 лет, детекторы на основе HR-GaAs:Cr являются высокоэффективными и перспективными в проведении экспериментов в области физики высоких энергий.

На данный момент в литературе отсутствуют сведения о механизмах протекания тока в детекторных HR-GaAs:Cr структурах при воздействии синхротронного излучения рентгеновского диапазона спектра, что послужило стимулом для изучения данного вопроса. В данной работе в качестве исследовательского инструмента использовалась система автоматизированного проектирования полупроводниковых устройств COMSOL, в которой проводилось моделирование транспорта неравновесных электронов в HR-GaAs:Cr структуре при воздействии единичного рентгеновского импульса с энергией квантов 20 кэВ. Длительность и интенсивность излучения соответствовали современным источникам синхротронного излучения и составляли 100 пс и  $6000$  Вт/см<sup>2</sup>, соответственно.

Задача сводилась к решению системы уравнений, состоящей из уравнений непрерывности и Пуассона на конечно-элементной сетке во временной области. Для упрощения задачи была построена 2D – модель HR-GaAs:Cr сенсора с двумя барьерными контактами и одномерной сеткой с шагом 25 нм вдоль направления протекания тока. Толщина сенсора составляла 500 мкм. Распределение хрома и теллура (мелкая донорная примесь) задавалось однородным профилем по толщине структуры, с концентрациями  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> и  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>, соответственно. В расчетах так же были заданы глубокие донорные E12-центры, распределенные однородным профилем с концентрацией  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

На *рис.1(а)* представлены расчетные профили концентрации неравновесных электронов в активной области HR-GaAs:Cr сенсора в моменты времени (2 – 20) нс после его облучения рентгеновским импульсом. Напряжение на аноде сенсора составляло 1000 В (облучение образца происходило со стороны катода). Можно заметить, что после оптической генерации происходит разделение пакета электронов на две составляющие, одна из которых (с наибольшей концентрацией) находится у катода и практически не перемещается, тогда как вторая (с меньшей концентрацией) движется в направлении анода, наводя ток во внешней цепи.

Для объяснения данного эффекта были построены профили напряженности электрического поля в разные моменты времени, рассчитанные в результате моделирования (*рис.1 (б)*). Видно, что вблизи катода ( $x < 40$  мкм), сгенерированные носители заряда практически полностью экранируют внешнее электрическое поле ( $E \approx 0$ ), вследствие чего их дрейф сводится к минимуму и движение в основном происходит только за счет диффузии. В области  $x > 40$  мкм поле отлично от нуля и практически линейно возрастает до анода, вследствие чего часть электронов уносится из общего сгустка и дрейфует в направлении анода.

Важно отметить, что дрейф электронов до анода происходит в течении 20 нс, что в практически 3 раза превышает их “нормальное” время дрейфа в данном материале при напряжении 1000 В и толщине структуры 500 мкм. Из этого следует, что в HR-GaAs:Cr структуре при данных условиях численного эксперимента наблюдается плазменный эффект, который ранее не был обнаружен и количественно описан в данном материале.

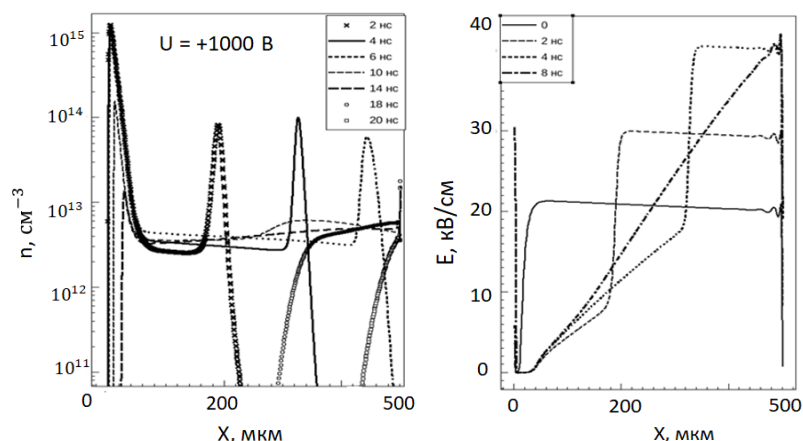


рис. 1. а) Профили распределения концентрации неравновесных электронов по толщине HR-GaAs:Cr структуры в разные моменты времени (анод справа); б) Профили распределения напряженности электрического поля по толщине HR-GaAs:Cr структуры в разные моменты времени.

Исследование выполнено при поддержке гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. (Соглашение № 075-15-2022-1132 от 01.07.2022 г.) в части моделирования распределения напряженности поля в HR GaAs:Cr сенсорах и Министерства науки высшего образования Российской Федерации (проект № ФCBM-2022-0018 «Исследование энергетического и пространственного разрешения EDX-детекторов на основе HR матричных сенсоров GaAs:Cr»).

Список публикаций:

- [1] A.V. Tyazhev et al., GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1 mm, Nucl. Instrum. Meth. A 509 (2003) 34.
- [2] D. Budnitsky et al., Chromium-compensated GaAs detector material and sensors, 2014 JINST 9 C07011.
- [3] S. Khludkov, L. Okaevich, A. Potapov and O. Tolbanov, GaAs structures with deep centres for ionizing radiation detection, Nucl. Instrum. Meth. A 395 (1997) 132.

## Мемристоры на основе германосиликатных стёкол

**Юшков Иван Дмитриевич**

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН*

*Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.*

*[ivanjushkov@gmail.com](mailto:ivanjushkov@gmail.com)*

Для развития цифровых технологий необходимо увеличение объёма памяти и повышения скорости записи и чтения данных. Современные типы памяти, такие как flash-память, уже достигли своих технологических пределов. Таким образом, создание принципиально новых типов универсальной энергонезависимой памяти является важной и актуальной задачей в современной нанoeлектронике. Так же, в последние годы большое внимание привлекают нейроморфные вычисления, предполагается, что благодаря возможности параллельной обработки сигналов они могут быть более эффективными, чем классические цифровые вычисления в архитектуре компьютеров фон Неймана [1]. При этом наиболее перспективными кандидатами на создание универсальной энергонезависимой памяти с возможностью использования в качестве электронных синапсов являются устройства на основе мемристоров [2]. Мемристор – это двухконтактная МДП или МДМ структура, обладающая двумя или более резистивными состояниями. Мемристоры обладающие более чем двумя резистивными состояниями, называются мультибитовыми мемристорами, а мемристоры обладающие непрерывным спектром резистивных состояний, называются аналоговыми.

Германосиликатные стёкла интересны тем, что они обладают несколькими типами ловушек от мелких – это включения  $\text{SiO}_x$  в  $\text{SiO}_2$ , до глубоких, это кластеры германия в  $\text{SiO}_2$ . Так же германосиликатные стекла могут обладать как стабильностью структуры, как  $\text{SiO}_x$ , так и низкой энтальпией связи как  $\text{GeO}_x$  [3].

Целью данной работы являлась реализация мультибитового мемристора на основе многослойных структур с содержанием германосиликатных стёкол.

Исследовалось 2 типа структур:  $\text{GeO}[\text{SiO}_2]/\text{p}^+\text{-Si}$  (или n-Si);  $\text{GeO}[\text{SiO}_2]/\text{Ge}/\text{SiO}_2/\text{p}^+\text{-Si}$  (или n-Si). Плёнки были получены методом высоковакуумного электронно-лучевого испарения и осаждения из газовой фазы при температуре подложки 300 К. В качестве верхнего электрода на плёнки  $\text{GeO}[\text{SiO}_2]$  был нанесён ИТО (оксид

олова и индия). Так же полученные образцы отжигались при температуре 500 °С в течении 30 минут в атмосфере воздуха.

Исследования структуры образцов проводились с использованием методов инфракрасной (ИК) спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеивания света (КРС) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС). Так же исследовались вольтамперные характеристики (ВАХ) до и после отжига и исследовалась выносливость мемристоров при многократных циклах перезаписи образцов до и после отжига.

В результате структурных исследований КРС и ИК методами было обнаружено, что отжиг приводит к увеличению содержания аморфного германия в образце ITO/GeO[SiO<sub>2</sub>]/Ge/SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si. Это может говорить о том, что плёнка германия является преципитатом для избыточного германия, содержащегося в плёнках GeO[SiO<sub>2</sub>]. Также после отжигов уменьшился пик от колебаний связей Ge-O-Si в спектрах ИК-поглощения. При помощи метода РФС была определена стехиометрия плёнки германосиликатного стекла - GeSi<sub>0,9</sub>O<sub>2,8</sub>.

В результате исследований ВАХ до и после отжига было обнаружено, что все образцы обладают мемристорным эффектом (обнаружены выключенное и включенное состояние), при этом все мемристоры не нуждаются в процессе формовки. Отжиг привёл к изменению характера переключения в обоих образцах. В исходном образце ITO/GeO[SiO<sub>2</sub>]/p<sup>+</sup>-Si переключения между состояниями однократное, при этом чётко выражены 2 резистивных состояния, после отжига возникают многократные промежуточные переключения перед включением основных резистивных состояний. Так же отжиг в образце ITO/GeO[SiO<sub>2</sub>]/p<sup>+</sup>-Si приводит к увеличению напряжений переключения с -2 и +1 В до -3 и +2 В [4]. В исходном образце ITO/GeO[SiO<sub>2</sub>]/Ge/SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si переключения между состояниями происходит непрерывно, отжиг приводит к возникновению однократного скачка тока при переключении, при этом резистивные состояния становятся явно различимы. Так же после отжига в обоих образцах наблюдается уменьшение тока в выключенном состоянии примерно в 100 раз [4]. В результате исследования выносливости при многократных циклах перезаписи обнаружено, что разброс “окна памяти” (разность тока в выключенном и включенном состоянии) после отжигов уменьшился.

Для образца ITO/GeO[SiO<sub>2</sub>]/Ge/SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si после отжига было обнаружено стабильное промежуточное состояние [4]. Данное промежуточное состояние может сохраняться на протяжении 250 циклов перезаписи [4]. При этом ток в промежуточном включенном состоянии отличается от тока в основном включенном состоянии в 100 раз. Так же в данном образце ток в выключенном промежуточном состоянии отличается от тока в выключенном основном состоянии в 4 раза. Таким образом, образец ITO/GeO[SiO<sub>2</sub>]/Ge/SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si может быть использован в качестве двухбитового мемристора.

Автор выражает благодарность Володину Владимиру Алексеевичу, Камаеву Геннадию Николаевичу, Просвирину Игорю Петровичу и Michel Vergnat за помощь в исследованиях.

Список публикаций:

- [1] Chen F., Zhou Y., Zhu Y., et al. // *J. Mater. Chem. C. Mater.* 2021. V. 9, P. 8372–8394.
- [2] Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams, R. S. // *Nature.* 2008. V. 453. P. 80-83.
- [3] Chou K. I., Cheng C. H., Zheng Z. W., et al. // *IEEE Electron Device Letters.* 2013. Vol. 34. P. 505-507.
- [4] Volodin V. A., Yushkov I. D., Kamaev G. N., Vergnat. M. // *Russian Microelectronics.* 2023. V. 52. P. S30–S37.

#### 4 - Физика атомного ядра и элементарных частиц. Физика высоких энергий

Земцов Роман Александрович, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики  
**Широтная и высотная зависимости генерации космогенного трития в земной атмосфере**  
Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [zemcov@sfedu.ru](mailto:zemcov@sfedu.ru) стр. 98

Зубарев Иван Борисович, 2 курс  
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики  
**Реализация установки гамма-гамма совпадений с использованием Na-22**  
Дулов Евгений Николаевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ivan4735@yandex.ru](mailto:ivan4735@yandex.ru) стр. 99

Куделя Савелий Александрович, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Производство и перенос космогенного трития в атмосфере в модели «PARMA»**  
Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [kudelya@sfedu.ru](mailto:kudelya@sfedu.ru) стр. 100

Кутергин Даниил Дмитриевич, 2 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Преимущества квазистатического подхода для моделирования лазерного кильватерного ускорения на длинных дистанциях**  
Лотов Константин Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [d.kutergin@g.nsu.ru](mailto:d.kutergin@g.nsu.ru) стр. 101

## Широтная и высотная зависимости генерации космогенного трития в земной атмосфере

**Земцов Роман Александрович**  
 Южный федеральный университет  
 Малышевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.  
[zemcov@sfedu.ru](mailto:zemcov@sfedu.ru)

Цели работы: моделирование образования космогенного трития в Земной атмосфере. Задачи работы: моделирование ядерно-электромагнитного каскада вторичного космического излучения в аналитической модели PARMA, выявление механизмов генерации космогенного трития.

Установлено, что генерация космогенного трития происходит под воздействием нейтронов и протонов вторичного космического излучения с ядрами, в основном, кислорода и азота:  ${}^8\text{O}_{16}(\text{P},\text{X}){}^1\text{H}_3$ ,  ${}^8\text{O}_{16}(\text{N},\text{X}){}^1\text{H}_3$ ,  ${}^7\text{N}_{14}(\text{P},\text{X}){}^1\text{H}_3$ ,  ${}^7\text{N}_{14}(\text{N},\text{T}){}^6\text{C}-12$  [1]. Приблизительно 70% трития образуется в стратосфере, 30% в тропосфере. Моделирование высотной (по глубине атмосферы) зависимости скорости образования космогенного трития производилось для экваториальных, умеренных широт и полюсов Земли. Для всех этих зон, для всех типов реакций, приведенных выше, скорость его образования с ростом высоты атмосферы (уменьшением глубины) от 0 м до 16 км, возрастает на два порядка (рис.1). Плотность потока нейтронов вторичного космического излучения на два-три порядка превышает плотность потока протонов. Это справедливо для всех высот атмосферы и геомагнитных широт.

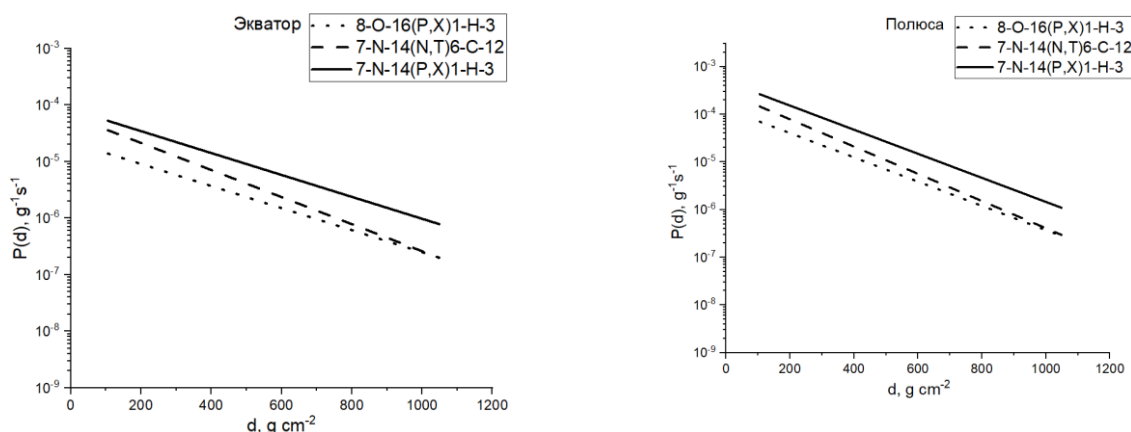


рис.1. Зависимость скорости образования космогенного трития от глубины атмосферы

Расчет широтной зависимости скорости образования космогенного трития выявил ее увеличение с ростом геомагнитной широты (рис.2). Максимум скорости достигается на полюсах  $0,18 \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ , минимум на экваторе  $0,1 \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ . Причем для всех видов реакций, она увеличивается в 4 раза, при движении от экватора к полюсам, что вызвано «широтным эффектом».

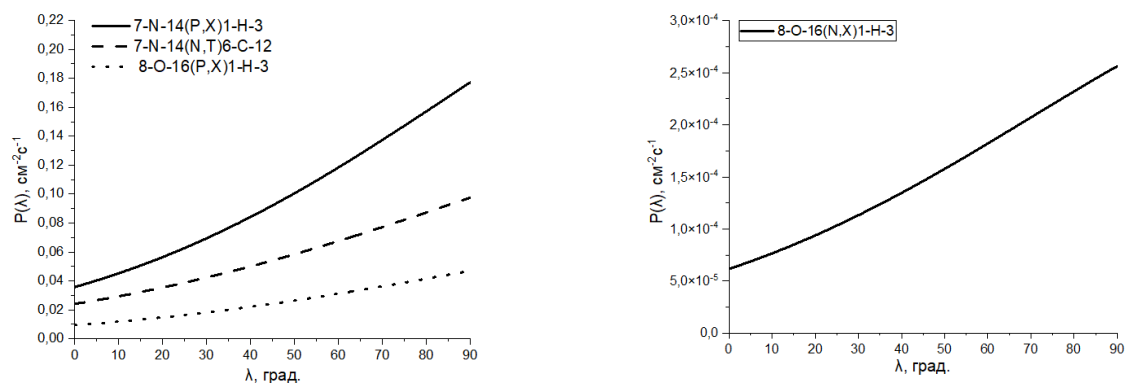


рис.2. Зависимость скорости образования космогенного трития от геомагнитной широты

Список публикаций:

[1] Ляхова О. В. Тритий как индикатор мест проведения ядерных испытаний // Конференция - конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан (прикладная). ДГП ИРБЭ РГП НЯЦ РК. 2011. 18 с.

## Реализация установки гамма-гамма совпадений с использованием $^{22}\text{Na}$

*Зубарев Иван Борисович*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

*Дулов Евгений Николаевич, к.ф.-м.н.*

*[ivan4735@yandex.ru](mailto:ivan4735@yandex.ru)*

При взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли образуются радиоактивные изотопы, которые называются космогенными. Энергия космических лучей достигает  $10^{11}$  ГэВ, этого достаточно для расщепления ядер на отдельные фрагменты и появления разнообразных радиоактивных изотопов. Космогенный  $^{22}\text{Na}$  образуется в стратосфере в результате взаимодействия протонов первичной компоненты космического излучения с атомами аргона. За счёт обмена воздушными массами между стратосферой и тропосферой  $^{22}\text{Na}$  оказывается у поверхности Земли.  $^{22}\text{Na}$  является  $\beta^+$  радиоактивным изотопом, при этом испускаемые позитроны аннигилируют с электронами, и испускаются два гамма-кванта в противоположных направлениях с энергией 511 кэВ.

Космогенный  $^{22}\text{Na}$  используется для оценки времени нахождения воды в реках и озерах [1]. Изучение водных водоемов с помощью космогенного  $^{22}\text{Na}$  даёт уникальную информацию, которую невозможно получить гидрологическими методами. Также соотношение долгоживущих и короткоживущих изотопов, например,  $^{22}\text{Na}$  и  $^7\text{Be}$  помогает определить период пребывания изотопов в атмосфере [2]. Наблюдение за движением воздушных масс производится с помощью датчиков, расположенных на Земле [3].

Методы совпадений и антисовпадений играют ключевую роль в радиометрии  $\beta^+$  радиоактивных изотопов. Гамма-гамма совпадения позволяют не только эффективно и точно определять распределение радиоактивного изотопа  $^{22}\text{Na}$  в образцах, но и обеспечивают высокую чувствительность.

Разрабатываемая в рамках настоящей работы экспериментальная установка состоит из двух сцинтилляционных детекторов, аппаратной схемы совпадений, высоковольтного источника питания и радиоактивного источника  $^{22}\text{Na}$ . Для наблюдения угловых корреляций гамма-лучей и аннигиляции электрон-позитронной пары измеряют количества совпадений, удерживая один из сцинтилляционных детекторов неподвижным и поворачивая другой сцинтилляционный детектор по окружности, в центре которой находится радиоактивный источник  $^{22}\text{Na}$ . Когда два гамма-кванта достигают детекторов одновременно, на выходе аппаратной схемы совпадений появляется сигнал.

Ожидаемая чувствительность разрабатываемой установки должна быть не хуже 9 мБк, и на ней можно будет измерять активность по изотопу  $^{22}\text{Na}$  космогенного или иного происхождения. Установку можно будет применять как в исследовательских целях, так и в качестве лабораторной установки ядерно-физического практикума.

Список публикаций:

[1] Sakaguchi, A. *Cosmogenic radionuclide  $^{22}\text{Na}$  in the Lake Biwa system (Japan): Residence time, transport and application to the hydrology* / A. Sakaguchi, Y. Ohtsuka, K. Yokota // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2005. – V. 231. – No.3. – P. 307-316.

[2] Zhang, W. *A gamma-gamma coincidence/anticoincidence spectrometer for low-level cosmogenic ( $^{22}\text{Na}/(^7\text{Be})$  activity ratio measurement* / W. Zhang, K. Ungar, M. Stukel, P. Mekarski // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2014. – V. 130. – No.1. – P. 1-6.

[3] Hoffman, I. *Circulation of cosmogenic  $^{22}\text{Na}$  using the global monitoring network of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO)* / I. Hoffman, B. Lewis, P. Chan // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – V. 187. – No.2. – P. 8-15.



## Производство и перенос космогенного трития в атмосфере в модели «PARMA»

Куделя Савелий Александрович

Мальшевский Вячеслав Сергеевич, Фомин Георгий Викторович

Южный федеральный университет

Мальшевский Вячеслав Сергеевич, д.ф.-м.н.

[kudelya@sfedu.ru](mailto:kudelya@sfedu.ru)

Тритий (Т) – является радиоактивным изотопом водорода с большим периодом полураспада (порядка 12 лет), изотоп образуется в ходе ядерных реакций происходящих в атмосфере под действием космических лучей, кроме того, вырабатывается в ходе работы предприятий ядерного цикла и, таким образом, является глобальным загрязнителем атмосферы и гидросферы [1]. Будучи химически аналогичным водороду, тритий участвует в круговороте воды, ввиду чего способен поступать во все живые организмы вместе с водой и в дальнейшем вызывать мутагенные изменения как за счёт воздействия  $\beta$ -излучения, так и изменения структуры молекул в результате замены водорода на нейтральный  $^3\text{He}$ . Таким образом, концентрация трития может служить маркером для целей дозиметрического контроля, анализа атмосферных процессов и исследований космических ливней. В то же время определение естественной концентрации космогенного трития усложняется невозможностью прямых замеров, так как количество трития, выброшенное в атмосферу в ходе термоядерных испытаний в 20 веке на порядки больше, чем его естественное содержание. Таким образом, задача определения естественной концентрации становится сугубо теоретической. Именно моделирование образования и переноса трития в атмосфере Земли является целью данной работы.

В настоящей работе проанализирован вклад реакций  $(n,X)$  и  $(p,X)$  на ядрах азота и кислорода, как наиболее распространённых в атмосфере газов, в производство космогенного трития. Расчет потоков налетающих частиц в ядерно-электромагнитном каскаде производился с использованием аналитической модели «PARMA» [2]. Была решена задача переноса трития в атмосфере в результате вертикальной турбулентной диффузии и получена зависимость его концентрации от высоты (рис. 1). Для проведения вычислений использовался интегро-интерполяционный метод.

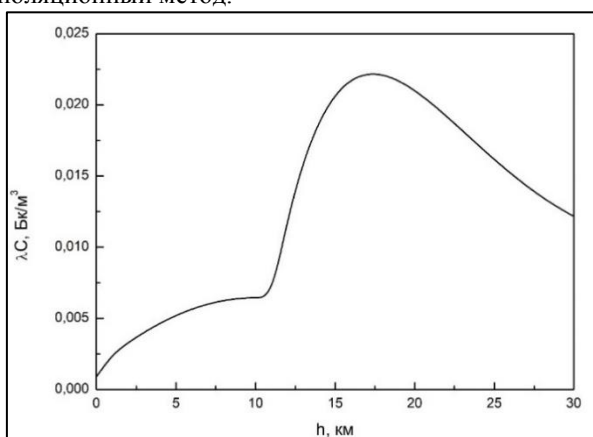


рис.1. Высотная зависимость концентрации трития в земной атмосфере.

Из полученной зависимости был оценён общий запас космогенного трития в земной атмосфере, он составил  $\sim 1,9 \cdot 10^{17}$  Бк. Расчеты показали, что в атмосфере содержится не более 10% от всего космогенного трития. Полученные результаты в целом согласуются с более ранними эмпирическими и полуэмпирическими моделями [3], подтверждающими, в том числе, что техногенный тритий составляет большую часть его полного запаса.

### Список публикаций:

- [1] Fairlie I. Tritium hazard report: pollution and radiation risk from Canadian nuclear facilities. June 2007. Greenpeace. 92 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/237319950\\_Tritium\\_Hazard\\_Report\\_Pollution\\_and\\_Radiation\\_Risk\\_from\\_Canadian\\_Nuclear\\_Facilities](https://www.researchgate.net/publication/237319950_Tritium_Hazard_Report_Pollution_and_Radiation_Risk_from_Canadian_Nuclear_Facilities).
- [2] Sato T., Yasuda H., Niita K., Endo A., Sihver L. Development of PARMA: PHITS-based analytical radiation model in the atmosphere, Radiation research. 2008;170(2):244–259. <https://doi.org/10.1667/RR1094.1>
- [3] Desyatov D.D., Ekidin A.A. Evaluation of tritium's entry into the environment from nuclear power plants' emissions. Biosphere compatibility: people, region, technologies. 2018;1(21):88–96. (In Russ.) Available at: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_34959688\\_46935708.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_34959688_46935708.pdf)

## **Преимущества квазистатического подхода для моделирования лазерного кильватерного ускорения на длинных дистанциях**

*Кутергин Даниил Дмитриевич*

*Новосибирский государственный университет*

*Лотов К.В., д.ф.-м.н.*

*[d.kutergin@ngsu.ru](mailto:d.kutergin@ngsu.ru)*

Лазер-плазменные методы ускорения в последнее время привлекают к себе все больше внимания благодаря перспективам создания компактных высокоградиентных ускорителей. Энергия ускоренных электронов уже достигла 10 ГэВ при длине ускорения десять сантиметров. Использование преимуществ проектируемой российской установки XCELS (eXawatt Center for Extreme Light Studies) позволит получить ещё большую энергию. Отсутствие строгости в определении будущих параметров, а также их обилие существенно затрудняет прямой поиск предельных возможностей установки. Методика двухэтапного моделирования сокращает число параметров на каждом из этапов и эффективно решает поставленную задачу.

Моделирование производится с помощью программного комплекса LCODE разработанного в ИЯФ СО РАН. Расчет одного варианта занимает около 1000 часов процессорного времени. Разбить моделирование на два этапа позволяет квазистатическое приближение, заложенное в основе LCODE.

В основном (тяжелом) расчете моделируется только лазер-плазменное взаимодействие, без учета электронного пучка. Варьируется радиус, длительность лазерного импульса и параметры плазменного канала. Поскольку начальную энергию электронов считаем достаточно большой, пренебрегаем их смещением относительно окна моделирования, движущегося со скоростью света. Набранную в зависимости от продольной координаты в окне энергию оцениваем интегральной суммой продольного поля на оси. Она определяет оптимальность выбранных параметров и предполагаемое расположение витнесса.

Состояния плазмы, сохраняемые с некоторой периодичностью непосредственно перед местом предполагаемого расположения витнесса, позволяют провести дополнительные (легкие) расчёты. В них моделируется взаимодействие только электронного пучка и кильватерной волны. Серия легких расчетов позволяет учесть влияние пучка на ускоряющие его поля и оптимизировать его параметры.

Несмотря на то, что интерес к плазменным методам ускорения возник благодаря высоким градиентам полей (рекорд - 200 ГВ/м), в работе показано, что использование меньшего градиента при увеличении длины ускорения позволит получать большую итоговую энергию электронов. Кроме того, эффективное моделирование позволило хорошо согласовать пучок с волной и найти область параметров, в которой его энергоразброс составил менее 1 %.



## 5 - Электрофизика, электрофизические установки. Физика плазмы, плазменные технологии

Дьячков Сергей Александрович, магистрант 1 года обучения  
Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет  
**Влияние поверхностного заряда на электрический пробой ксенона в длинной трубке**  
Ионих Юрий Зиновьевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [st076148@student.spbu.ru](mailto:st076148@student.spbu.ru)                      стр. 105

Евдокимов Александр Александрович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Модернизация блока питания развёртки промышленного ускорителя типа ИЛУ**  
Сингагулин Шавкат Рахимович,  
e-mail: [a.evdokimov1@g.nsu.ru](mailto:a.evdokimov1@g.nsu.ru)                      стр. 106

Иванов Артем Евгеньевич, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет  
**Лабораторное моделирование разлета квазисферического облака плазмы во внешнее магнитное поле и фоновую плазму**  
Чиبرانов Алексей Алексеевич,  
e-mail: [arteemiyy.iv@gmail.com](mailto:arteemiyy.iv@gmail.com)                      стр. 107

Корж Виталий Александрович, 4 курс  
Новосибирск, Институт ядерной физики имени Будкера, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Сравнение интенсивности D-D реакции для трех профилей магнитного поля на установке ГДЛ**  
Максимов Владимир Васильевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [v.korz@nnsu.ru](mailto:v.korz@nnsu.ru)                      стр. 108

Логинов Михаил Викторович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет  
**Разработка измерительного контура, работающего по методу удалённого зонда в лабораторных экспериментах с лазерной плазмой**  
Березуцкий Артём Григорьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [misha.logv@gmail.com](mailto:misha.logv@gmail.com)                      стр. 109

Лотов Игорь Константинович, 2 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Учёт захвата плазменных электронов в квазистатическом подходе к моделированию кильватерного ускорения**  
Туев Петр Викторович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [i.lotov@g.nsu.ru](mailto:i.lotov@g.nsu.ru)                      стр. 110

Манегин Денис Сергеевич, аспирант 4 года обучения  
Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, факультет энергомашиностроения  
**Результаты испытаний бессеточных ионных источников модифицированной конструкции**  
Ивахненко Сергей Геннадьевич, к.т.н.  
e-mail: [manegin@bmstu.ru](mailto:manegin@bmstu.ru)                      стр. 111

Параскун Александр Григорьевич, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Спиральный генератор с разделёнными в пространстве индуктивной и емкостной частями для импульсного рентгеновского аппарата**  
Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н.  
e-mail: [a.paraskun@g.nsu.ru](mailto:a.paraskun@g.nsu.ru)                      стр. 113

Токарев Арсений Юрьевич, 4 курс

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, физико-механический факультет

**Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния для исследования магнитогидродинамических неустойчивостей в токамаке Глобус-M2**

Яшин Александр Юрьевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [tokarev\\_ayu@spbstu.ru](mailto:tokarev_ayu@spbstu.ru)

стр. 114

# Влияние поверхностного заряда на электрический пробой ксенона в длинной трубке

Дьячков Сергей Александрович

Мещанов Александр Викторович

Санкт-Петербургский государственный университет

Ионих Юрий Зиновьевич, д.ф.-м.н.

[st076148@student.spbu.ru](mailto:st076148@student.spbu.ru)

Длинными трубками называются трубки, для которых расстояние между электродами много больше их диаметра. В таких трубках электрический пробой начинается с первичного пробоя между высоковольтным электродом (ВВЭ) и стенкой трубки, что приводит к инициализации прохождения локализованной области высокого градиента потенциала (волны ионизации) [1]. При движении вдоль трубки ВИ ионизует газ, что создает условия для дальнейшего развития пробоя.

Для возникновения и движения волны ионизации большое значение имеет состояние стенки трубки возле ВВЭ. При наличии заряда на ней напряжение пробоя может повышаться. [2]. Одним из объяснений этого эффекта служит явление фотодесорбции. В процессе медленного повышения напряжения на аноде слабосвязанные электроны под действием светового излучения видимого диапазона выбиваются со стенки трубки и уходят на анод. При этом стенка приобретает положительный потенциал.

В данной работе было рассмотрено, как происходит пробой при различных условиях. В частности, наблюдалось прохождение ВИ при различных видах импульсов напряжения на аноде, при импульсном и постоянном освещении. Также рассматривалось изменение напряжения пробоя на свету относительно напряжения пробоя в темноте.

Эксперименты проводились с использованием отпаянной стеклянной трубки, наполненной ксеноном при давлении 1 Торр. Расстояние между краями электродов – 790 мм, внутренний диаметр трубки – 15 мм. Для регистрации волны ионизации использовались оптические волноводы, ФЭУ, а также емкостные датчики. В качестве источников освещения использовались светодиод с длиной волны 400 нм и люминесцентные лампы.

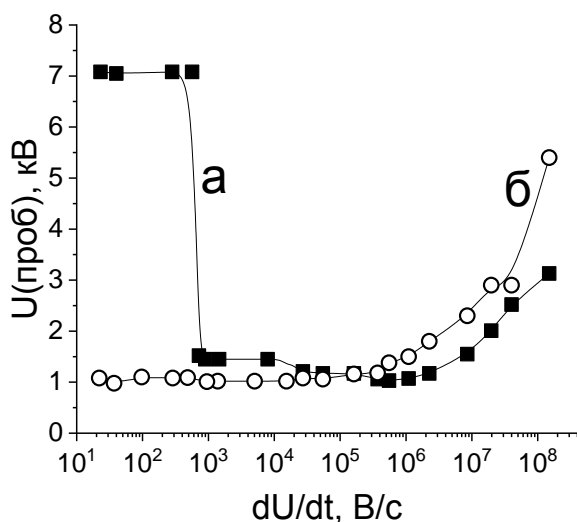


рис.1 Зависимость напряжения пробоя в ксеноне (1Торр) от скорости роста напряжения на аноде. а – при освещении, б – в темноте.

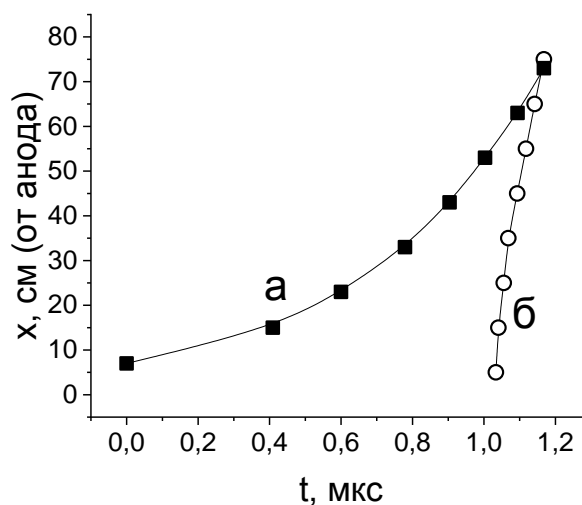


рис.2 Зависимость положения фронта волны ионизации (x) от времени (t). а – линейно растущее напряжение, с освещением; б – прямоугольный импульс напряжения, в темноте.

При низкой скорости роста напряжения на аноде (менее  $10^3$  В/с) напряжение пробоя намного выше при освещении, чем в темноте (рис.1).

При линейно растущем напряжении и при освещении волна ионизации ускоряется по мере отдаления от анода (рис.2, кривая а), что отличается от ситуации, когда напряжение подается в виде прямоугольного импульса и трубка не освещается (рис.2, кривая б). В данном случае скорость волны ионизации уменьшается.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что в прианодной области на стенке трубки при освещении накапливается заряд.

Список публикаций:

[1] Недоспасов А. В., Новик А. Е. // ЖТФ, 1960, т.30, с.1329.

[2] A. V. Meshchanov, A. I. Shishpanov, Y. Z. Ionikh // J. Phys. D: Appl. Phys. 57 (2024) 015204

## Модернизация блока питания развёртки промышленного ускорителя типа ИЛУ

Евдокимов Александр Александрович

Новосибирский государственный университет

Сингатулин Шавкат Рахимович

[a.evdokimov1@g.nsu.ru](mailto:a.evdokimov1@g.nsu.ru)

С 70-ых годов в ИЯФ СО РАН разрабатываются и производятся промышленные импульсные линейные ускорители (ИЛУ), используемые для холодной пастеризации пищевой продукции, полимеризации, деполимеризации и других целей. Ускорители через систему выпуска сканируют пучком рабочую зону горизонтальной развёрткой по типовой ширине облучаемой продукции около 70 см. Система развёртки включает магнит развёртки (рис.1) с соответствующим источником питания. Магнит развёртки должен равномерно поворачивать пучок от  $+50^\circ$  до  $-50^\circ$  за характерное время, а также обеспечить линейно меняющееся магнитное поле с нелинейностью не более 5% для качественного облучения выходной продукции.

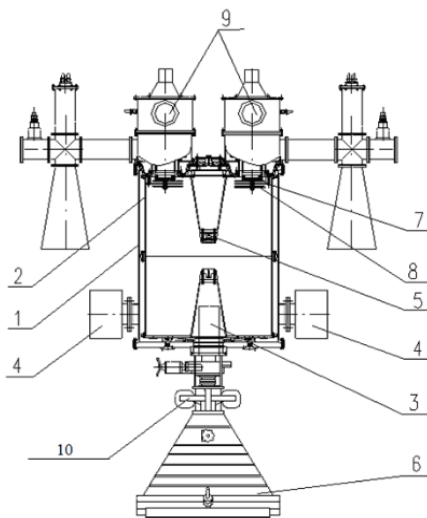


рис.1. Ускоритель ИЛУ-10.

1 – вакуумный бак, 2 – медный тороидальный резонатор, 3 – магнитная линза, 4 – магниторазрядные насосы, 5 – катодно-сеточный узел, 6 – устройство выпуска пучка с линейной развёрткой, 7 – опора петли связи, 8 – вакуумный конденсатор, 9 – ВЧ генераторы. 10 – Магнит развёртки пучка.

В связи с развитием полупроводниковой промышленности появился запрос на модернизацию питания магнита развёртки с целью программируемости амплитуды тока по времени (поля магнита), упрощения и удешевления конструкции источника, облегчения калибровки ускорителя, увеличения КПД. Задача разработки усложнена тем, что магнит развёртки находится на горловине, внутри которой проходит пучок. Горловина состоит из нержавеющей стали и создаёт паразитные магнитные поля, которые нарушают линейность магнитного поля.

В существующей схеме формирование тока в магните определяется релаксационным разрядом многоконтурной схемы с предварительно заряженными емкостями, с коммутацией на тиристорах. Подстройка форм тока реализована на механическом подборе набора конденсаторов, подстройке номиналов индуктивностей. Амплитуда тока определяется напряжением зарядки конденсаторов.

Были измерены параметры модели магнита с горловиной, предложенной в тексте [2]. Предложена новая схемотехника источника питания с использованием ШИМ модуляции тока.

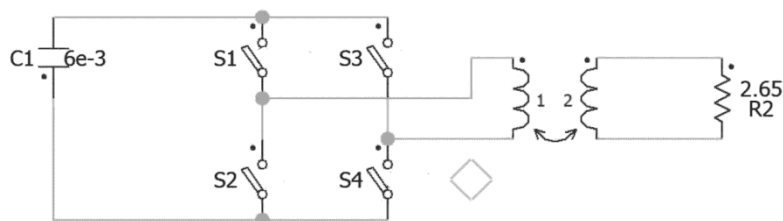


рис. 2. Новая принципиальная схема. Ключи S1-S4 – SiC транзисторы.

Трансформатор с резистором во вторичной обмотке (рис. 2) – модель, описывающая магнит и горловину по теории электрических цепей. Получены аналитические зависимости тока от времени при приложении импульсного напряжения к магниту, на основе чего предложены алгоритмы управления магнитом. Ток в магните задается набором состояний ключей S1, S2, S3, S4. Для получения линейного спада тока необходимо включить одну диагональ моста (ключи S1 и S4), затем другую (ключи S2 и S3).

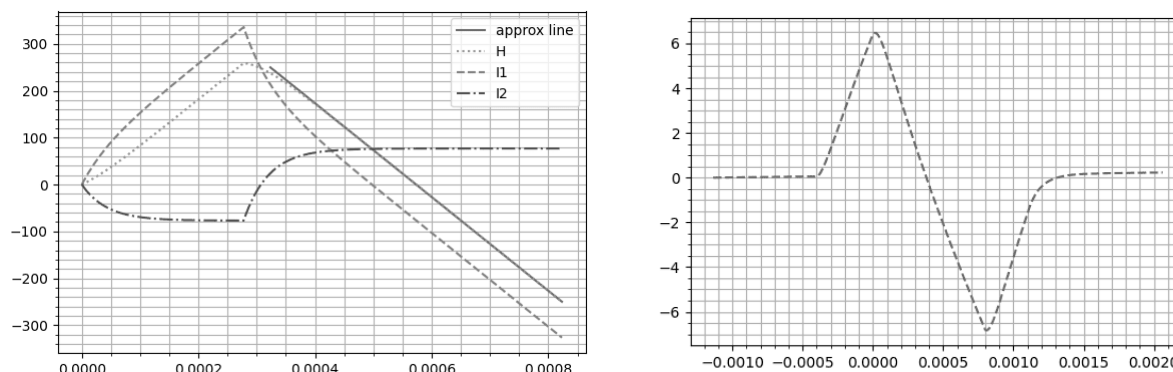


рис. 3. Слева изображены теоретические зависимости тока и магнитного поля от времени.  $I_1$  – ток в первичной обмотке,  $I_2$  – ток во вторичной обмотке,  $H$  – магнитное поле. Справа изображена экспериментально полученная зависимость магнитного поля от времени.

Для предложенного способа построены теоретические зависимости токов и магнитного поля. Проведены измерения магнитного поля, с помощью измерительной катушки и последующим численным интегрированием. Экспериментальные кривые совпали по виду с теоретическими зависимостями (рис. 3).

Данная работа посвящена модернизации питания магнита развёртки и включает новую схему питания магнита, аналитические выражения для зависимостей тока источника и магнитного поля от времени, экспериментальную установку, подтверждающую расчёты.

Список публикаций:

- [1] Безуглов В. В. и др. Промышленные ускорители ИЛУ в современных радиационно-технологических комплексах. Вопросы атомной науки и техники выпуск 71. Москва: АО «НИТФА» 2015, С. 25-36.
- [2] Безуглов В. В. и др. Препринт ИЯФ 2008-23: методика расчета и конструирования выпускных устройств для импульсных ускорителей электронов серии ИЛУ. Новосибирск: ИЯФ СО РАН 2008 г.
- [3] Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие для вузов / Г. И. Атабеков. — 10-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 592 с. — ISBN 978-5-8114-7104-1.

## Лабораторное моделирование разлета квазисферического облака плазмы во внешнее магнитное поле и фоновую плазму

**Иванов Артем Евгеньевич**

Березуцкий Артем Григорьевич, Долгов Александр Евгеньевич, Захаров Юрий Петрович, Логинов Михаил Викторович., Мирошниченко Илья Борисович, Посух Виталий Георгиевич, Руменских Марина Сергеевна, Трушин Павел

Александрович, Чибранов Алексей Алексеевич, Шайхисламов Илдар Фаритович

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Чибранов Алексей Алексеевич

[arteemiyv@gmail.com](mailto:arteemiyv@gmail.com)

На установке КИ-1[1-2] в конце 2023 года был проведен лабораторный эксперимент, направленный на моделирование различных геофизических и астрофизических явлений, сопровождающихся сферическими выбросами плазмы в замагниченный фон. Основное новшество данной работы заключается во взаимодействии квазисферического облака лазерной плазмы (ОЛП) с замагниченным фоном.

Замагниченный фон представлял собой поток водородной плазмы в однородном магнитном поле, заполняющий весь объем вакуумной камеры. Источником фоновой плазмы являлся тета-пинч. Внешнее магнитное поле создавалось соленоидом вокруг камеры. ОЛП создавалось облучением 4-мя лучами мощного CO<sub>2</sub> лазера шарообразной полиэтиленовой мишени [3]. Измерения проводились системой магнитных и электрических зондов.



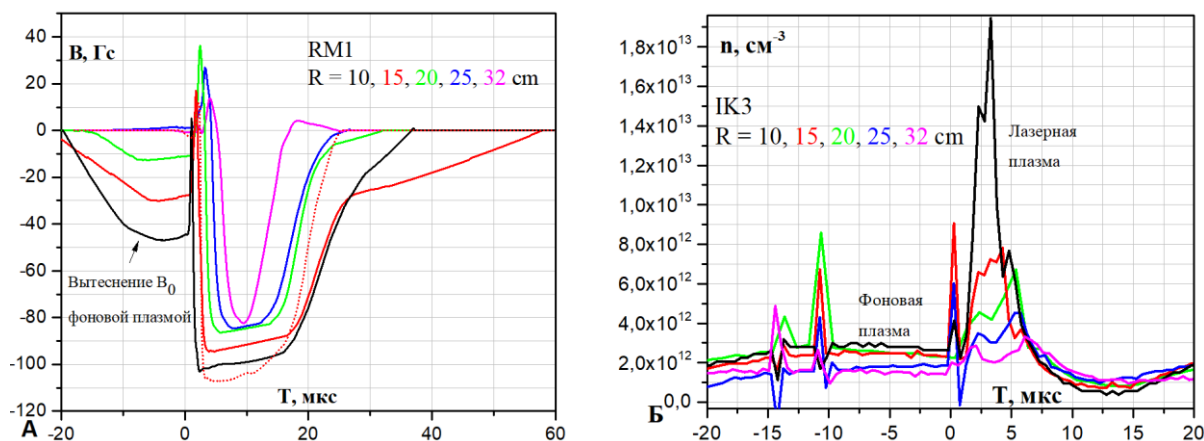


рис. 1. Разлет ОЛП в фоновую плазму и внешнее магнитное поле  $B_0 = 96$  Гс. А - Магнитная каверна при разлете ОЛП в замагниченный фон, красным пунктиром – разлет в вакуумное магнитное поле на расстоянии 15 см; Б - Концентрация ионов при разлете ОЛП в замагниченный фон;  $T = 0$  мкс – момент облучения лазерной мишени.

В результате проведенного эксперимента были получены данные о влиянии замагниченного фона на динамику ОЛП, а также на длительность, скорость и характер протекания коллапса диамагнитной каверны. На рисунке продемонстрированы эффекты вытеснения внешнего поля фоновой плазмой, а также вытеснения фона при разлете ОЛП.

Проведенный эксперимент на установке КИ-1 по моделированию явлений, происходящих как в околоземном космическом пространстве, так и в дальнем космосе, поможет лучше разобраться в эффектах взаимодействия сферических плазменных облаков с фоновой плазмой во внешнем магнитном поле, а также позволит создавать численные модели, более приближенные к натурным явлениям.

Работа выполнена при поддержке программы 10 «Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика» Национального Центра Физики и Математики и гранта РФФ 23-22-00386.

Список публикаций:

- [1] Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г. Лазерная плазма и лабораторное моделирование нестационарных космических процессов. – (1988).
- [2] Антонов В. М. и др. Мощные CO<sub>2</sub>-лазеры для плазменных экспериментов и технологии //Новосибирск: Изд ИТПМ СО АН СССР. – (1986).
- [3] Berezhitsky A. G. et al. Sub-Alfvénic Expansion of Spherical Laser-Produced Plasma: Flutes, Cavity Collapse and Field-Aligned Jets //Plasma Physics Reports. – (2023). – Т. 49. – №. 3. – С. 351-361.

## Сравнение интенсивности D-D реакции для трех профилей магнитного поля на установке ГДЛ

**Корж Виталий Александрович**

Новосибирский государственный университет

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера

Максимов Владимир Васильевич, к.ф.-м.н.

[v.korzh@gsnu.ru](mailto:v.korzh@gsnu.ru)

Газодинамическая ловушка [1] (ГДЛ) – линейная осесимметричная магнитная ловушка, разработана в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера (ИЯФ) для проведения исследований в области физики плазмы и создания управляемого термоядерного синтеза. На основе ГДЛ возможно создать источник 14 МэВ нейтронов (дейтерий-третиевая плазма) для испытания материалов, которые будут использоваться в термоядерных реакторах, на устойчивость к нейтрону потоку [2]. Особенностью газодинамической ловушки является двухкомпонентная плазма: мишенная плазма, быстрые ионы. Мишенная плазма - дейтериевая или водородная плазма, удерживаемая в газодинамическом режиме. Данная компонента создается с помощью генератора плазмы. Быстрые ионы – инжектируемые под углом 45° атомы дейтерия с энергией 25 кэВ, захваченные мишенной плазмой. Удержание данной компоненты происходит в адиабатическом режиме (аналогично пробкотрону Будкера-Поста [3]). При движении быстрых ионов вдоль магнитного поля сохраняется магнитный момент (адиабатический инвариант). Продольная скорость частиц равняется нулю в точках остановки (пробочное отношение 2), в дальнейшем они отражаются и двигаются в противоположную сторону. Таким образом, концентрация быстрых ионов имеет пикированный профиль (максимальная плотность около точек

остановки). Время жизни определяется столкновениями с электронами. Распределение быстрых ионов зависит от конфигурации магнитного поля, создаваемого с помощью магнитных катушек. С помощью недавно установленных катушек можно значительно изменить положение точек остановки, тем самым поменять функцию распределения. На установке ГДЛ можно работать в трех конфигурациях: стандартная, средняя, короткая.

Энергия быстрых ионов на установке ГДЛ достаточна для наблюдения продуктов термоядерных D-D реакций (при инжекции дейтерия). В результате столкновения быстрых ионов с быстрыми ионами и дейтронами мишенной плазмы появляется с равной вероятностью 3,02 МэВ протон и 1,01 МэВ T или 2,45 МэВ нейтрон и 0,82 МэВ  $^3\text{He}$ . Целью данной является измерение полного числа реакций в единицу времени для всех трех возможных конфигураций магнитного поля. Таким образом D-D реакции на установке ГДЛ моделируют нейтронный поток в D-T 14 МэВ источнике нейтронов.

В данной работе используется сцинтилляционный детектор (для регистрации 2,45 МэВ нейтронов) и набор полупроводниковых детекторов (для регистрации 3,02 МэВ протонов). Сцинтилляционный детектор, установленный в центральной плоскости на расстоянии 175 см от центра установки, работает в потоковом режиме, регистрируя сигнал, пропорциональный числу нейтронов и гамма квантов в единицу времени. Гамма кванты образуются в результате захвата нейтронов. Сигнал с данного детектора показывает обзорный поток нейтронов. Полупроводниковые детекторы, установлены вдоль оси установки с характерным расстоянием до оси установки 30 см, работают в счетном режиме, сигнал пропорционален энергии, оставленной в полупроводниковом слое, позволяют получить число реакций в единицу времени из единицы длины.

Для получения полного числа реакций в единицу времени (интенсивность) D-D реакций требуется провести калибровку сцинтилляционного детектора, с помощью полупроводниковых детекторов и модельного профиля нейтронного выхода DD реакций, построенного на основе парных кулоновских столкновений. Образование неустойчивостей в плазме приводит к значительному изменению профиля реакции, таким образом профиль, полученный с помощью полупроводниковых детекторов, можно сравнивать с модельным профилем только до момента образования неустойчивости. Калибровка детектора производится сравнением сигнала со сцинтиллятора и временного хода полупроводникового детектора.

В результате был получен коэффициент пропорциональности между сигналом со сцинтилляционного детектора и интенсивности D-D реакций для трех конфигураций равный  $(1,1 \pm 0,6) \cdot 10^{11} \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Так же было учтено изменение потока связи с изменением конфигурации. В стандартной и средней конфигурации полное число реакций равно  $3,4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ , а для короткой ямы результат на 20% меньше.

Список публикаций:

- [1] Мирнов В. В., Рютов Д. Д. Газодинамическая ловушка линейная ловушка для удержания плазмы // Письма в ЖТФ. - 1979. - Т. 5, N 11. - С.673-682.
- [2] Котельников И. А. и др. Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловушки //препринт ИЯФ, Новосибирск. – 1990.
- [3] Будкер Г. И. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросам о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. / Ред. М. А. Леонтович. - М.: Изд. АН СССР, 1968ю — Т.3. - С.3.

## **Разработка измерительного контура, работающего по методу удалённого зонда в лабораторных экспериментах с лазерной плазмой**

**Логинов Михаил Викторович**

*Березуцкий Артем Григорьевич, Долгов Александр Евгеньевич, Захаров Юрий Петрович, Иванов Артём Евгеньевич, Мирошниченко Илья Борисович, Посух Виталий Георгиевич, Руменских Марина Сергеевна, Трушин Павел Александрович, Чибранов Алексей Алексеевич, Шайхисламов Илдар Фаритович*

*Институт лазерной физики СО РАН*

*Новосибирский государственный технический университет*

*Березуцкий Артем Григорьевич, к.ф.-м.н.*

*[misha.logv@gmail.com](mailto:misha.logv@gmail.com)*

На установке КИ-1[1-2] в 2023 году был введён в эксплуатацию новый измерительный контур для регистрации моделей различных геофизических и астрофизических явлений, которые сопровождалась сферическими выбросами лазерной плазмы в замагниченную фоновую плазму. Актуальность данной работы заключается в измерении возмущения внешнего магнитного поля и контроле повторяемости параметров плазмы, что является важным условием при проведении лабораторных экспериментах.

В работе представлены результаты измерительного контура, работающего в качестве удаленного зонда на экспериментальной установке. Зонд позволяет контролировать создание внешнего магнитного поля  $B_0$  в вакуумной камере, интегральное возмущение поля  $B_0$  при разлете облака лазерной плазмы и замагниченной фоновой плазмы, а также отслеживать повторяемость разлета лазерной плазмы (см. рисунок).

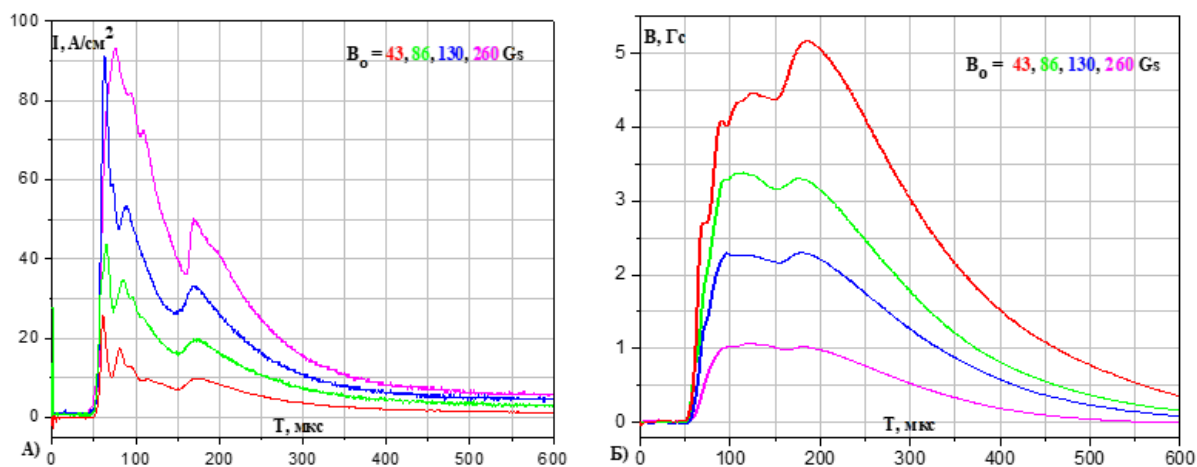


рис.1. Плотность тока, измеренная при разлете фоновой плазмы во внешнее магнитное поле  $B_0$  разной величины (А) и соответствующее поджатие поля, зарегистрированное зондом (Б).

Таким образом, зонд продемонстрировал хорошую чувствительность к плотности и скорости разлета плазменного облака и позволил отслеживать повторяемость плазменных параметров во время проведения эксперимента. Также он позволял более точно контролировать внешнее магнитное поле, генерируемое соленоидом вакуумной камеры.

Список публикаций:

- [1] Y.P. Zakharov et al // *AIP Conference Proceedings*. – American Institute of Physics, 369, № 1, p. 357-362, (1996).  
 [2] I. F. Shaikhislamov et al // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56, № 12, p. 125007, (2014).

## Учёт захвата плазменных электронов в квазистатическом подходе к моделированию кильватерного ускорения

**Лотов Игорь Константинович**

*Новосибирский государственный университет*

*Петр Викторович Туев, к.ф.-м.н.*

[i.lotov@g.nsu.ru](mailto:i.lotov@g.nsu.ru)

В последнее время все больше исследований посвящено уменьшению размеров ускорителей заряженных частиц. Плазменное кильватерное ускорение – удачный для этого метод, при котором электроны ускоряются в полях, достигающих сотен ГВ/м [1]. Особенно интересным представляется режим ускорения, для которого не требуется отдельный инжектор ускоряемых частиц. В этом случае ускоряемый пучок формируется из захваченных волной плазменных электронов. Захват происходит в сильно нелинейном режиме взаимодействия, для исследования которого используют численное моделирование [2]. Современные задачи требуют значительных вычислительных мощностей, поэтому важно развивать эффективно их использующие программные комплексы (коды), например, разрабатываемый в ИЯФ СО РАН LCODE [3]. Он использует квазистатическое приближение [2], дающее выигрыш в быстродействии вплоть до 6 порядков в сравнение с моделированием из первых принципов [4]. Однако пока что использование этого приближения при исследовании захвата плазменных электронов давало лишь качественное представление о происходящих процессах.

В квазистатическом приближении частицы плазмы и пучка описываются разными физическими моделями. При захвате плазменной частицы ее необходимо начать рассматривать как частицу пучка. Сложность заключается в том, что если при захвате напрямую подменить плазменную частицу на пучковую, то развиваются сильнейшие шумы, из-за которых дальнейшее моделирование становится абсолютно неправильным.

Развитие численной неустойчивости удалось побороть следующим образом. Теперь, шаг моделирования, на котором происходит захват плазменных частиц, вычисляется несколько раз, причем быстрые частицы

плазмы заменяются частицами пучка. В этот момент согласованно изменяются токи системы, чтобы не возникало скачка производной в уравнениях на электромагнитные поля. В итоге впервые можно говорить о количественном согласии с результатами расчетов без квазистатического приближения, на примере кода FBPIC [5] (рис. 1). Это доказывает возможность использования модифицированного квазистатического подхода для исследования захвата плазменных электронов кильватерной волной.

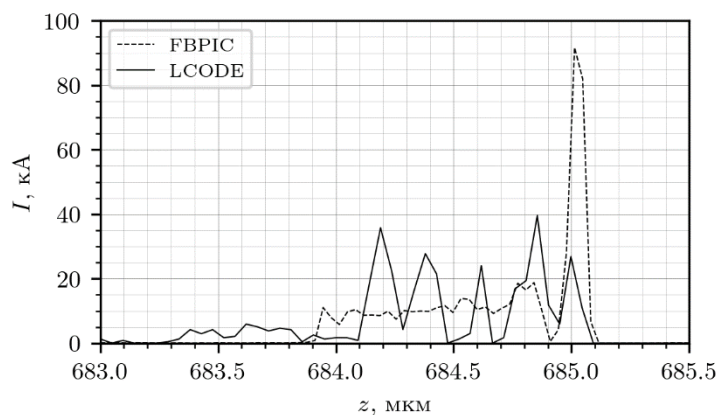


рис.1. Зависимость тока пучка захваченных электронов  $I$  от продольной координаты  $z$ , рассчитанная кодом без приближений FBPIC и квазистатическим кодом LCODE.

Список публикаций:

- [1] Albert F., Couprie M.E., Debus A., Downer M.C., Faure J., Flacco A., Gizzi L.A., Grismayer T., Huebl A., Joshi C., Labat M., Leemans W.P., Maier A.R., Mangles S.P.D., Mason P., Mathieu F., Muggli P., Nishiuchi M., Osterhoff J., Rajeev P.P., Schramm U., Schreiber J., Thomas A.G.R., Vay J.-L., Vranic M., Zeil K. // *New J. Phys.* 2021. № 23. С. 031101.  
 [2] Vay J.-L., Lehe R. // *Rev. Accelerator Science Technology.* 2016. № 9. С. 165.  
 [3] lcode <https://lcode.info/>.  
 [4] Дорожжина М.С., Балувев К.В., Кутергин Д.Д., Лотов И.К., Минаков В.А., Спицын Р.И., Туев П.В., Лотов К.В. // *Квантовая электроника.* 2023. № 53. С. 176.  
 [5] Lehe R., Kirchen M., Andriyash I.A., Godfrey B.V. and Vay J.-L. // *Computer Physics Communications.* 2016. № 203. С. 66.

## Результаты испытаний бессеточных ионных источников модифицированной конструкции

**Манегин Денис Сергеевич**

*Соколов Владимир Дмитриевич, Плотникова Ольга Петровна, Воробьев Евгений Валентинович*  
 Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
 Ивахненко Сергей Геннадьевич  
[manegin@bmsstu.ru](mailto:manegin@bmsstu.ru)

Одним из распространённых типов ионных ускорителей на эффекте Холла являются бессеточные ионные источники (БИИ), также называемые торцевыми холловскими ускорителями (ТХУ) или End-Hall [1]. Возможность генерации широко расходящихся ускоренных пучков со средней энергией до 300 эВ и интегральным значением ионного тока в пределах нескольких ампер позволяет успешно использовать БИИ при ионном ассистировании, финишной очистке и травлении поверхности. Большая часть производящихся различными компаниями БИИ выполнены по общей конструктивной схеме, предложенной Гарольдом Кауфманом [2]. Характерной отличительной чертой данной схемы является то, что задняя стенка разрядной камеры гальванически изолирована от анода и находится под плавающим потенциалом. Данная схема также называется схемой с отражателем. В то же время существует альтернативный подход, при котором задняя стенка разрядной камеры находится под потенциалом анода и является его составной частью [3].

Ранее коллективом сотрудников МГТУ им. Н.Э. Баумана были разработаны и испытаны бессеточные ионные источники, выполненные по обоим конструктивным схемам [4]. В настоящей работе представлены результаты исследований работы БИИ улучшенной конструкции, с модифицированной системой охлаждения и оптимизированной формой анода. БИИ был изготовлен как в исполнении с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры (БИИ-10ан), так и в исполнении с отражателем (БИИ-10отр). Оба ионных источника работали совместно с газопроточным термоэмиссионным катодом-нейтрализатором. В качестве рабочего газа и для источника, и для катода использовался аргон. Расход через катод-нейтрализатор был постоянным во всех экспериментах и составлял 0,17 мл/с. Напротив ионного источника была установлена гальванически изолированная мишень. Ток эмиссии катода-нейтрализатора подбирался таким образом, чтобы потенциал,

приобретаемый мишенью в пучке, не превышал  $\pm 5$  В относительно земли. Для облегчения условий работы катода на него подавался отрицательный относительно земли потенциал смещения, который составлял 25 В или 50 В и учитывался в величине разрядного напряжения. Для изучения пространственного распределения ионного тока БИИ использовался зонд Фарадея с охранным кольцом, установленный на поворотном манипуляторе.

Оба ионных источника продемонстрировали стабильную работу при напряжениях разряда от 100 до 300 В. При этом диапазон рабочих расходов аргона БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры оказался смещён в сторону более низких значений по сравнению с БИИ с отражателем, что соответствует ранее полученным результатам [4]. Так БИИ-10ан функционировал при расходах  $2,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,25$  мл/с, в то время как БИИ-10отр –  $0,17 \dots 0,5$  мл/с. Для обоих ионных источников были подобраны значения индукции магнитного поля, при которых достигались наибольшие значения ионного тока на зонд. В целом плотность ионного тока, генерируемого БИИ с отражателем, оказалась существенно выше, чем в случае БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры – до  $1,97$  мА/см<sup>2</sup> для БИИ-10отр и до  $0,68$  мА/см<sup>2</sup> для БИИ-10ан на расстоянии от среза 275 мм. Значения тока на зонд в области напротив среза источника для БИИ-10отр превышали значения для БИИ-10ан практически в два раза (рис. 1). Однако на периферии токи практически совпадали и к тому же мало зависели от значения индукции магнитного поля.

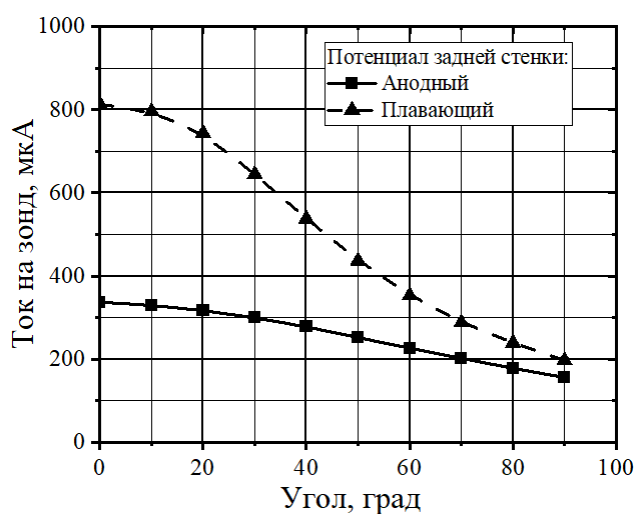


рис.1. Пространственное распределение ионного тока на зонд для БИИ с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры (ток разряда 5 А, напряжение 175 В)

Оба ионных источника показали более стабильную и эффективную работу по сравнению с предыдущей модификацией. БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры характеризовался существенно меньшими значениями плотности ионного тока, однако позволял достигать целевых значений разрядного напряжения при меньших расходах аргона и более низких давлениях в вакуумной камере. Последнее было также подтверждено в ходе дополнительных испытаний БИИ-10отр и БИИ-10ан на ксеноне, криптоне, азоте и кислороде при напряжениях разряда 50 В, 150 В и 300 В.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках субсидии на выполнение государственного задания № 075-03-2023-095/8 от 10 августа 2023 г.

Список публикаций:

- [1] Zhurin V.V. *Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. Weinheim: Wiley-VCH. 2012. 312 p.
- [2] H.R. Kaufman, R.S. Robinson. *End-Hall Ion Source*. United States Patent № 4,862,032. 1989.
- [3] W. G. Sainty. *Ion Source*. United States Patent US № 6,849,854 B2. 2005.
- [4] Манегин Д.С., Соколов В.Д., Шилов С.О., Воробьев Е.В., Серушкин С.В., Ивахненко С.Г. Исследование параметров работы бессеточных ионных источников. // *Инженерный журнал: наука и инновации*. №12. 2023. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-12-2322.

## Спиральный генератор с разделёнными в пространстве индуктивной и емкостной частями для импульсного рентгеновского аппарата

*Параскун Александр Григорьевич*

*Новосибирский государственный университет*

*Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н.*

*[a.paraskun@g.nsu.ru](mailto:a.paraskun@g.nsu.ru)*

Среди методов исследования динамики вещества и его распределения в пространстве рентгеновские методики занимают особое место, оказываясь, в ряде случаев, практически единственными, позволяющими получить достоверную информацию об исследуемых объектах и процессах. Одной из таких задач является проведение на баллистическом стенде ударных испытаний углеволоконных композитных материалов на ударное воздействие. Основными требованиями к рентгеновской аппаратуре в такой задаче являются мобильность и малогабаритность используемого рентгеновского аппарата.

Наиболее подходящим для создания такого рентген-аппарата, однако, в то же время, наиболее малоисследованным источником высоковольтных импульсов напряжения является спиральный генератор, предложенный Фитчем и Хауэллом в 1964 году [1]. Устройство данного типа позволяет получать наносекундные импульсы с напряжением 100 – 600 кВ и содержит при этом минимальное количество деталей.

Спиральный генератор представляет собой устройство, запасующее электрическую энергию при одном, относительно низком напряжении, и разряжающее накопленную энергию в виде электрического импульса с напряжением, во много раз превосходящим запасенное. Он состоит из двухшинной проводящей линии, свернутой в рулон. При распространении волны в спиральной линии, электрическая энергия переходит в энергию магнитного поля, и электрическую энергию коаксиальных емкостей, включающихся последовательно. После отражения от разомкнутых концов линии, энергия магнитного поля в ней начинает переходить в электрическую, и волна в активной линии меняет полярность. Когда отраженная волна окажется в точке, где установлен коммутатор, напряжение между началом и концом спирали достигает своего максимального значения.

Однако низкое волновое сопротивление двухшинной линии плохо согласуется с реальной паразитной индуктивностью замыкающего её разрядника. Что ухудшает КПД устройства. В работе создаются и исследуются различные варианты спиральных генераторов, индуктивная и емкостная части которых разделены в пространстве вдоль оси намотки рулона [2]. В результате такого профилирования волновое сопротивление длинной двухшинной спиральной линии повышается в три раза, что положительно влияет на КПД устройства.

Параметры изготовленного генератора следующие. Размеры: внешний диаметр спирали, состоящей из двух шин из 11 и 12 витков – 52 мм, внутренний диаметр 40,5 мм. Измеренный коэффициент трансформации  $k=12,5$ . Измеренное время нарастания импульса от нуля до максимального напряжения составляет 60 нс.

Представлено численное решение задачи зависимости напряжения на выходе генератора от времени. Процесс распространения электромагнитной волны в активной и пассивной линиях описывается телеграфными уравнениями, а процесс стекания заряда описывается моделью классического колебательного контура. Решение распространения волн находилось методом Годунова, а для вычисления граничных условий для спирального генератора использовались явные разностные схемы первого порядка.

В работе также представлены экспериментальные результаты распределения индукции магнитного поля внутри спиральной линии во времени, полученные численным интегрированием напряжения на индуктивном датчике, размещённом внутри генератора. Приводятся численные модели пространственного моделирования распределения магнитного поля внутри и снаружи спирального генератора, полученные в программе моделирования в конечных элементах femm. Выявлены зависимости влияния ферритового магнитопровода в спиральной линии на распределение магнитного поля и на КПД генератора соответственно.

Результаты, полученные в работе, позволяют с достаточной точностью предсказывать и моделировать физические параметры спиральных генераторов. Решение позволяет создать компактный генератор наносекундных высоковольтных импульсов, который может быть использован для изготовления портативного рентгеновского аппарата с взрывной эмиссией электронов.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет - 2030».

Список публикаций:

[1] Fitch R.A., Howell V.T.S. // *Patent. Appl.* 1961. P. 18 136.

[2] Пальчиков Е.И. Спиральный генератор высоковольтных импульсов. Патентная заявка, приоритет №2021120420 от 09.07.2021, МПК – H03K 31, H01P 30, H05G 30.

## Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния для исследования магнитогидродинамических неустойчивостей в токамаке Глобус-М2

Токарев Арсений Юрьевич

Яшин Александр Юрьевич, Пономаренко Анна Михайловна

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Яшин Александр Юрьевич, к.ф.-м.н.

[tokarev\\_ayu@spbstu.ru](mailto:tokarev_ayu@spbstu.ru)

В современных установках магнитного удержания плазмы наблюдается большое количество разнообразных плазменных неустойчивостей. Особое внимание заслуживают магнитогидродинамические (МГД) явления ввиду их разнообразия и сильного влияния на удержание [1]. Развитие некоторых из них, например, периферийных локализованных мод (ELMs), может привести к повреждению установки [2]. Из-за этого исследование МГД неустойчивостей является важной задачей. В установках с термоядерными параметрами плазмы для ее решения возможно использование только бесконтактных методов диагностики. Благодаря возмущению магнитного поля, всегда сопровождающему данные неустойчивости, их появление возможно обнаруживать, а их развитие исследовать с помощью многих методов диагностики, обнаруживающих возмущения магнитного поля. Наиболее часто для этого используются магнитные зонды. Однако они обладают плохим пространственным разрешением и не позволяют определять амплитуду возмущения. В случае плотной и неоднородной плазмы сложно сопоставить сигнал магнитного зонда с реальным расположением и амплитудой неустойчивости из-за эффектов затухания и экранирования магнитного поля. Необходимы более локальные методы, использующие зондирование плазмы СВЧ или лазерным излучением.

Одним из мощных способов, позволяющих изучать магнитогидродинамические неустойчивости, является диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), установленная на токамаке Глобус-М2 в ФТИ им. Иоффе в Санкт-Петербурге [3]. Она включает 2 многочастотных рефлектометра с наклонными антеннами для зондирования плазмы. Диагностика ДОР позволяет оценивать флуктуации плотности плазмы и измерять скорость ее вращения перпендикулярно магнитному полю, а значит и радиальное электрическое поле  $E_r$  [4]. Благодаря применению многочастотного зондирования возможно построение радиальных профилей электрического поля и флуктуаций плотности. В данной работе приведено применение диагностики ДОР для исследования различных МГД неустойчивостей в токамаке Глобус-М2. Показаны ее возможности по обнаружению и локализации таких явлений, как неоклассические тиринг-моды, альфвеновские колебания, геодезические акустические моды (GAM), периферийные локализованные моды, филаменты, колебания предельного цикла (LCO). Результаты диагностики ДОР сравниваются с сигналами магнитных зондов, также установленных на токамаке Глобус-М2. Показана возможность определения относительной амплитуды флуктуаций по сигналу ДОР.

Список публикаций:

[1] Hender T.C., et al // *Nucl. Fusion*. 2007. V. 47. P. S128.

[2] Leonard A.W. // *Phys. Plasmas*. 2014. V. 21. P. 090501.

[3] Yashin A.Y., et al // *JINST*. 2022. V. 17. P. C01023.

[4] Conway G.D., et al // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2004. V. 46. P. 951.

## 6 – Магнетизм

Ибрагимова Алина Рамилевна, 4 курс

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт

**Влияние магнитного поля на структуру и свойства  $0^\circ$  доменных границ в одноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом.**

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

e-mail: [alya.nizyamova.96@mail.ru](mailto:alya.nizyamova.96@mail.ru) стр. 117

Иванов Сергей Вадимович, магистрант 1 года обучения

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Исследование неоднородных магнитоэлектрических композитов**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [sivanovvad@mail.ru](mailto:sivanovvad@mail.ru) стр. 117

Иванов Станислав Олегович, магистрант 2 года обучения

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем

**Исследование способа поляризации пьезоэлектрических материалов**

Семёнов Геннадий Алексеевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [staskarta@mail.ru](mailto:staskarta@mail.ru) стр. 119

Ивашева Елена Евгеньевна, 4 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт конструирования и технологии электронных средств

**Разработка и исследование магнитоэлектрической структуры на основе волокон из аморфного сплава и ЦТС-19**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [ellen9879@yandex.ru](mailto:ellen9879@yandex.ru) стр. 120

Ильсова Галия Флюсовна, ассистент

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт

**Структура и свойства кл -скирмионов в неоднородных ферромагнитных пленках**

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

e-mail: [galiya.siraeva2014@yandex.ru](mailto:galiya.siraeva2014@yandex.ru) стр. 122

Карева Катерина Валерьевна, аспирант 3 года обучения

Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет

**Комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме**

Вагнер Дмитрий Викторович, к.т.н.

e-mail: [katkareva1@gmail.com](mailto:katkareva1@gmail.com) стр. 123

Кафаров Руслан Гайдарович, 4 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт конструирования и технологии электронных средств

**Перестраиваемый полосно-пропускающий СВЧ фильтр на магнитоэлектрических резонаторах**

Лобекин Вячеслав Николаевич

e-mail: [evraudx14@gmail.com](mailto:evraudx14@gmail.com) стр. 124

Козонов Александр Юрьевич, 2 курс

Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники

**Магнитоэлектрический датчик магнитного поля на основе магнитострикционно-пьезоэлектрической структуры**

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [s241716@std.novsu.ru](mailto:s241716@std.novsu.ru) стр. 126



Косырев Леонид Николаевич, 10 класс  
Красноярск, МАОУ СШ № 72 им. М.Н. Толстихина  
**Магнитные свойства многослойных наноструктур на основе Co и Ni**  
Косырев Николай Николаевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [leonidkosyrev752@gmail.com](mailto:leonidkosyrev752@gmail.com) стр. 128

Марков Иван Юрьевич, 4 курс  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, конструирования и технологии электронных средств  
**Исследование магнитоэлектрических градиентных структур PZT/Metglas/Ni**  
Бичурин Мирза Имамovich, д.ф.-м.н.  
e-mail: [ivanmarckov02@mail.ru](mailto:ivanmarckov02@mail.ru) стр. 129

Сердюк Анастасия Андреевна, 4 курс  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
**Наночастицы семейства ферритов  $Co_{1-x}Mg_xFe_2O_4$ : магнитные свойства и применение**  
Эдельман Ирина Самсоновна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [Onyoursde4@gmail.com](mailto:Onyoursde4@gmail.com) стр. 130

Сыроварова Кристина Андреевна, 2 курс  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, отделение электроники  
**Исследование формирования магнитоэлектрических структур методом магнетронного распыления**  
Бичурин Мирза Имамovich, д.ф.-м.н.  
e-mail: [crstnaa@icloud.com](mailto:crstnaa@icloud.com) стр. 132

Торопова Екатерина Сергеевна, магистрант 1 года обучения  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, радиофизический факультет  
**Влияние термообработки на структуру и свойства наночастиц  $Fe_{0.55}Co_{2.45}O_4$**   
Эдельман Ирина Самсоновна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [topotova2002@gmail.com](mailto:topotova2002@gmail.com) стр. 133

## **Влияние магнитного поля на структуру и свойства $0^\circ$ доменных границ в одноосных пленках с флексомагнитоэлектрическим эффектом**

**Ибрагимова Алина Рамилевна**

*Вахитов Роберт Миннисламович, Солонецкий Ростислав Владимирович*

*Уфимский университет науки и технологий*

*Вахитов Роберт Миннисламович*

*[alya.nizyamova.96@mail.ru](mailto:alya.nizyamova.96@mail.ru)*

В настоящее время одним из перспективных направлений в развитии наномagnetизма, тесно связанной с разработками различных устройств спинтроники, считается исследования магнитоэлектрических материалов [1,2]. Они характеризуются двумя и более параметрами порядка и обладают рядом интересных и необычных свойств. В частности, к ним относится и обнаруженное в пленках ферритов-гранатов при комнатных температурах явление смещения доменных границ (ДГ) под действием неоднородного электрического поля [2]. Было высказано предположение, что данное явление обусловлено наличием в пленках неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия (флексомагнитоэлектрический эффект [1]), которое подтвердилось в ходе дальнейших исследований [3]. В частности, в работе [4] был проведен теоретический анализ микромагнитных структур, возможных в тонких пленках с флексомагнитоэлектрическим (ФМЭ) взаимодействием и показано, что в них наряду с  $180^\circ$  ДГ могут существовать как устойчивые образования, еще два типа ДГ:  $0^\circ$  ДГ с квазиблоховской структурой и  $0^\circ$  ДГ типа Нееля. Они характеризуются нетривиальными свойствами, но пока мало изучены, а экспериментально не были обнаружены [2]. В частности, первый тип  $0^\circ$  ДГ может зародиться только при больших значениях электрического поля, значительно превышающих их характерные значения, а у второго типа структура ДГ такова, что образующиеся заряды в области ДГ экранируют друг друга (интегральная величина поляризации равна нулю). Поэтому представляет собой интерес исследования влияния магнитного поля на условия зарождения, структуру и полярность  $0^\circ$  ДГ в рассматриваемой пленке (как внешнего фактора с потенциальными возможностями изменения их свойств).

Численный анализ уравнений Эйлера-Лагранжа показал, что наличие магнитного поля существенно изменяет структуру и свойства  $0^\circ$  ДГ обоих типов. При этом для каждого типа  $0^\circ$  ДГ всегда существует такое направление магнитного поля, при котором возрастает величина интегральной поляризации. В частности, в случае  $0^\circ$  ДГ квазиблоховского типа эффект увеличения интегральной поляризации (т.е. усиления ФМЭ эффекта) можно достичь в слабых магнитных полях в случае, когда  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oz}$ . Однако при этом электрическое поле должно быть не малым. Кроме того, действием магнитного поля на квазиблоховскую  $0^\circ$  ДГ можно изменить критическое поле зарождения в ту или иную сторону и даже достичь того, чтобы отсутствовал порог её зарождения. В случае, когда  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{Oy}$  структура  $0^\circ$  ДГ существенно трансформируется: характер распределения вектора намагниченности становится ассиметричным.

Во втором случае, если внешнее магнитное поле  $\mathbf{H}$  направлено вдоль оси  $Ox$ , то тогда (и только в этом случае) может возникнуть ФМЭ эффект, достаточный для его наблюдения в экспериментальных условиях.

Список публикаций:

[1] Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. // *Phys. Usp.*, 55, 2012

[2] Logginov A.S. et al. // *JETP Letters*, 86, 2007

[3] Veshchunov I. S. et al. // *Phys.Rev.Lett.*, 115, 027601 (2015)

[4] Maksutova F.A., Pyatakov A.P., Vakhitov R.M., Solonetskiy R.V. // *EPL*. 129, 27004 (2020)

## **Исследование неоднородных магнитоэлектрических композитов**

**Иванов Сергей Вадимович**

*Соколов Олег Владимирович*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович*

*[sivanovvad@mail.ru](mailto:sivanovvad@mail.ru)*

Неоднородным магнитоэлектрическим (МЭ) композитом считается композит, длина или ширина пьезоэлектрической и магнитострикционной фаз которого не равны. Ранее были исследованы неоднородные МЭ композиты с длиной магнитострикционного материала большей, чем длина пьезоэлектрика [2]. Также были проведены исследования для обратного случая: применялся пьезоэлектрик с длиной больше, чем магнитострикционный материал [3]. В данном исследовании планируется определить теоретическую зависимость обратного МЭ коэффициента и прямого МЭ коэффициента от разности длин фаз трехслойного симметричного МЭ композита АМАГ-225/ЦТС-19/АМАГ-225 (рис. 1).

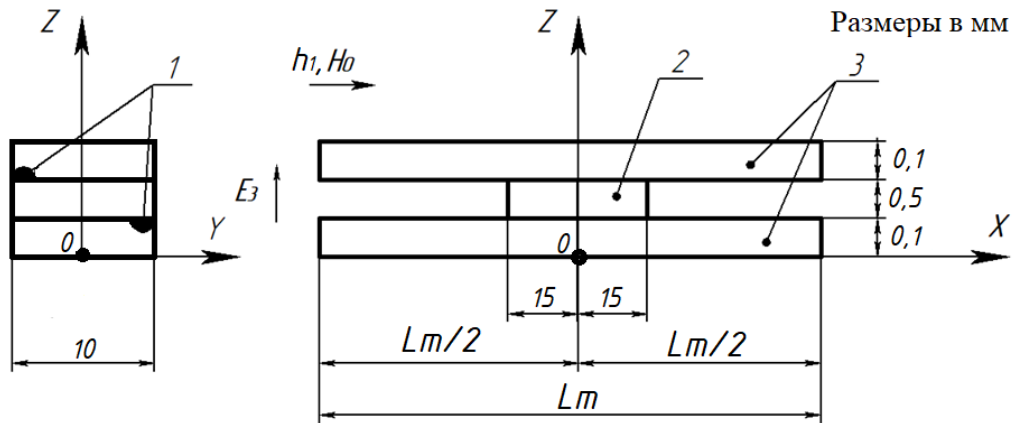


рис. 1 Эскиз исследуемого неоднородного симметричного МЭ композита.

На рис. 1: 1 – электроды, соединенные с пьезоэлектриком, для подключения МЭ композита к генератору или нагрузке, 2 – пьезоэлектрическая фаза (ЦТС-19), 3 – магнитострикционная фаза (АМАГ-225),  $H_0 = 6,5$  (Э) – внешнее постоянное подмагничивающее поле,  $E_3$  – переменная напряженность электрического поля в пьезоэлектрике композита,  $h_1$  – переменное магнитное поле, приложенное к магнитострикционной фазе композита,  $L_m$  – длина магнитострикционной фазы композита.

Функциональные свойства МЭ композитов определяются обратным МЭ коэффициентом в случае обратного МЭ эффекта и МЭ коэффициентом по напряжению в случае прямого МЭ эффекта [1]. Теоретические расчеты зависимости обратного МЭ коэффициента от частоты переменного электрического поля  $E_3$  и зависимости МЭ коэффициента по напряжению от частоты переменного магнитного поля  $h_1$  выполнены по методике, приведенной в работе [4]. В ходе расчета МЭ композит (рис. 1), был условно разделен на три участка: участок без ЦТС-19, участок с ЦТС-19 и АМАГ-225, участок без ЦТС-19. Затем с помощью материальных уравнений для каждого участка были определены выражения для расчета частотной зависимости переменной магнитной индукции, возникающей в композите в случае обратного МЭ эффекта, и переменного электрического поля в композите, возникающего в случае прямого МЭ эффекта. В итоге с помощью ранее определенных частотных зависимостей переменной магнитной индукции и переменного электрического поля была найдена теоретическая частотная зависимость МЭ коэффициентов для неоднородных МЭ композитов (рис. 1), для продольной моды колебаний свободного композита. На частоте электромеханического резонанса (ЭМР) значения МЭ коэффициентов становятся максимальными.

Чтобы найти теоретическую зависимость резонансного значения МЭ коэффициентов от разности длин фаз были определены резонансные значения для композитов с длиной ЦТС-19, равной 30 мм, и различной длиной АМАГ-225 в диапазоне от 30 мм до 180 мм, изменяющейся с шагом 5 мм. Результаты проведенных теоретических расчетов представлены на рис. 2. На рис. 2: точки – рассчитанные резонансные значения МЭ коэффициентов, линия – аппроксимирующая функция восьмого порядка, полученная с помощью метода наименьших квадратов в программе Maple.

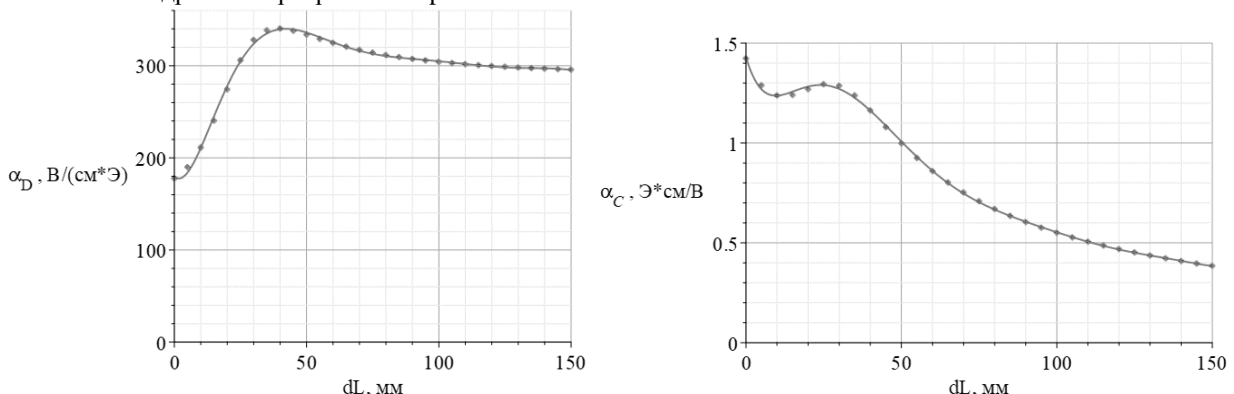


рис. 2 Теоретическая зависимость прямого  $\alpha_D$  и обратного  $\alpha_C$  МЭ коэффициентов от разности длин магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз композита при постоянной длине пьезоэлектрика 30 мм и на резонансной частоте для каждой длины магнитострикционной фазы. Продольная мода, свободный симметричный МЭ композит.

Согласно проведенным расчетам, при постоянной длине пьезоэлектрика композита АМАГ-225/ЦТС-19/АМАГ-225 резонансные значения обратного МЭ коэффициента уменьшаются при возрастании разности

длин фаз неоднородного МЭ композита, при этом МЭ коэффициент по напряжению принимает максимальное резонансное значение при разности длин фаз, равной 40 мм. Данные выводы можно использовать при проектировании различных устройств на основе МЭ эффекта, которые могут обладать большой чувствительностью и небольшими габаритными размерами: датчики магнитного поля, фильтры, генераторы, фазовращатели, гираторы, антенны и т. д. В будущих исследованиях планируется проверить данные теоретические результаты на практике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № No 24–15–20044.

Список публикаций:

[1] Bichurin, M.I.; Petrov, V.M.; Petrov, R.V.; Tatarenko, A.S. *Magnetolectric Composites*; Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.: Singapore, 2019; 280 p.

[2] Cunzhen Dong, Yifan He, Menghui Li, Cheng Tu, Zhaoqiang Chu, Xianfeng Liang, Huaihao Chen, Yuyi Wei, Mohsen Zaeimbashi, Xinjun Wang, Hwaider Lin, Yuan Gao, and Nian X. Sun. *A Portable Very Low Frequency (VLF) Communication System Based on Acoustically Actuated Magnetolectric Antennas*. *IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS*, VOL. 19, NO. 3, MARCH 2020.

[3] А.В. Калгин, С.А. Груднев, З.Н. Грибе. Особенности обратного магнитоэлектрического эффекта в двухслойных композитах Tb<sub>0.12</sub>Dy<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.68</sub>-PbZr<sub>0.53</sub>Ti<sub>0.47</sub>O<sub>3</sub>. *Физика твердого тела*, 2014, том 56, вып., с. 1278–1283.

[4] Bichurin, M.; Sokolov, O.; Ivanov, S.; Leontiev, V.; Petrov, D.; Semenov, G.; Lobekin, V. *Physics of Composites for Low-Frequency Magnetolectric Devices*. *Sensors* 2022, 22, 4818. <https://doi.org/10.3390/s22134818>

## **Исследование способа поляризации пьезоэлектрических материалов**

**Иванов Станислав Олегович**

*Институт электронных и информационных систем*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Семенов Геннадий Алексеевич, к.т.н.*

*[staskarta@mail.ru](mailto:staskarta@mail.ru)*

Поляризация пьезоэлектрических материалов является важным процессом, который используется в различных областях науки и техники. Пьезоэлектрические материалы обладают способностью преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Это свойство используется в пьезоэлектрических преобразователях, которые широко применяются в ультразвуковых исследованиях, датчиках давления, акселерометрах и других устройствах. Однако, для эффективной работы таких устройств необходимо правильно поляризовать пьезоэлектрический материал, что является сложной задачей, требующей тщательного изучения и анализа. Наши исследования поляризации образцов связаны с созданием магнитоэлектрических слоистых структур на основе поляризованной пьезоэлектрической керамики PZT-5Н [1].

В данной статье мы рассмотрим теоретические основы поляризации пьезоэлектрических материалов, а также проведем экспериментальное исследование различных методов поляризации и сравним их эффективность.

Теоретические основы

Пьезоэлектрический эффект – это явление возникновения электрических зарядов на поверхности диэлектрика под действием механических напряжений. И наоборот, механическое напряжение может возникать при приложении электрического поля. Это явление обусловлено тем, что в некоторых кристаллических диэлектриках (пьезоэлектриках) под действием внешнего электрического поля происходит упорядочение электрических диполей.

Существует несколько способов поляризации пьезоэлектриков:

1. Механическая поляризация – заключается в приложении механического напряжения к материалу.
2. Электрическая поляризация – осуществляется путем приложения электрического поля к материалу.
3. Комбинированная поляризация – включает в себя оба предыдущих способа.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор оптимального способа поляризации зависит от конкретных условий применения пьезоэлектрического материала.

Экспериментальное исследование

Для проведения экспериментального исследования была выбрана пара пьезоэлектрик-керамика PZT-5Н. Образцы имели форму диска диаметром 10 мм и толщиной 1 мм.



*рис.1 Пьезоэлектрический керамический диск pzt-5h*

Исследование проводилось на установке, состоящей из источника питания, генератора сигналов, измерительного оборудования и образцов. Для измерения характеристик поляризации использовались вольтметр, амперметр и осциллограф.

Результаты эксперимента показали, что наиболее эффективным способом поляризации PZT-5H является комбинированный метод, при котором сначала прикладывается механическое напряжение, а затем – электрическое поле. В результате такой поляризации достигается максимальная величина пьезоэлектрического эффекта.

Таким образом, в данной статье были рассмотрены теоретические основы и проведено экспериментальное исследование способов поляризации пьезоэлектрических материалов. Результаты исследования показали, что комбинированный метод поляризации является наиболее эффективным и позволяет достичь максимальной величины пьезоэлектрического эффекта. Эта методика будет использована нами в дальнейшем при создании магнитоэлектрических композитов.

Список публикаций:

[1] Bichurin M., Petrov V. // *Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, Volume 201, 2014, 108p.*

## **Разработка и исследование магнитоэлектрической структуры на основе волокон из аморфного сплава и ЦТС-19**

*Ивашева Елена Евгеньевна*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.*

*[ellen9879@yandex.ru](mailto:ellen9879@yandex.ru)*

В последнее время устройства и системы на основе магнитоэлектрического (МЭ) эффекта вызывают огромный интерес в различных областях науки и техники. Большое число публикаций посвящено изучению МЭ эффекта в слоистых структурах, состоящих из магнитоэлектрических и пьезоэлектрических пластин. МЭ структуры находят применение в датчиках магнитных полей [1], харвестерах [2]. Разработка и исследование новых технологий создания МЭ структур позволит добиться улучшения выходных характеристик, следовательно, повысить эффективность различных устройств и систем на их основе.

В данной работе исследуется технология изготовления МЭ структуры – магнитопьезофибера. Он состоит из волокон магнитоэлектрического и пьезоэлектрического (пьезофибер) материалов АМАГ-225 и ЦТС-19, соответственно. Пьезофибер состоит из волокон ЦТС-19 в матрице на основе клея, а также встречно-штыревых электродов и каптонового скотча.

Рассмотрим процесс изготовления пьезофибера: 1) вырезаются 5 тонких волокон размерами 30x2x0.5 мм из пластины ЦТС-19 с помощью дисковой резки; 2) заранее обезжиренные волокна размещаются в подготовленной форме для заливки, при этом расстояние между волокнами составляет 1 мм; 3) пьезоэлектрические волокна (пьезоволокна) заливаются клеем (матрица) и происходит процесс сушки в течение 24 часов; 4) после полного высыхания клея, на подготовленный слой матрицы с пьезоволокнами, с каждой стороны, наносятся встречно-штыревые электроды с зеркальным рисунком; 5) структура покрывается каптоновым скотчем; 6) пьезофибер поляризуется при подаче на встречно-штыревые электроды напряжения 1 кВ в течение 5 минут при комнатной температуре для увеличения пьезоэлектрического модуля  $d_{33}$ .

Далее рассмотрим процесс изготовления волокон из магнитострикционного материала АМАГ-225 (магнитофибер): 1) механическим способом нарезаются волокна размерами 30х2 мм из пластины АМАГ-225 толщиной 21 мкм; 2) готовые волокна обезжириваются.

После подготовки пьезофибера и магнитофибера необходимо приклеить с помощью клея волокна АМАГ-225 к каждой стороне пьезофибера и сушить полученный образец магнитопьезофибера в течение 24 часов под прессом.

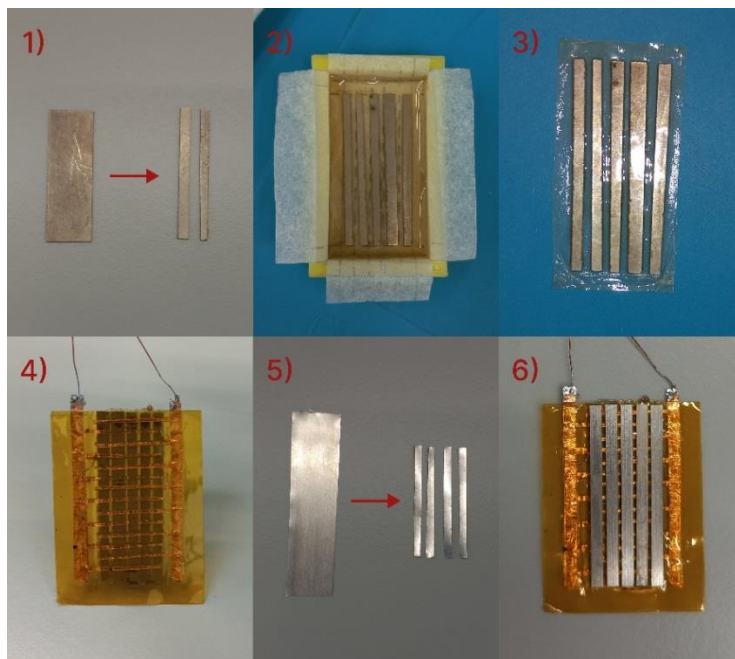


рис.1. Процесс создания магнитопьезофибера: 1) нарезка волокон ЦТС-19; 2) волокна ЦТС-19, залитые клеем в форме для заливки; 3) готовый слой волокон ЦТС-19 в матрице; 4) поляризованный пьезофибер, состоящий из волокон ЦТС, клеевой матрицы, встречно-штыревых электродов и каптона; 5) нарезка пластины метгласа на волокна; 6) готовая структура магнитопьезофибера

На (рис.1) представлен процесс изготовления структуры магнитопьезофибера, где 1) нарезка пластины ЦТС на волокна; 2) волокна ЦТС в клеевой матрице в заранее подготовленной форме для заливки; 3) застывшая матрица с волокнами ЦТС; 4) поляризованный пьезофибер, состоящий из волокон ЦТС, клеевой матрицы, встречно-штыревых электродов и каптона; 5) нарезка пластины метгласа на волокна; 6) готовая структура магнитопьезофибера.

В ходе разработки технологии магнитопьезофибера были сделаны следующие выводы: 1) необходимо учитывать вид встречно-штыревых электродов (ширину штырей, расстояние между ними, их количество) и соблюдать точное совпадение верхнего и нижнего рисунка электродов при нанесении его на слой матрицы с пьезоэлектрическими волокнами; 2) исходя из рисунка встречно-штыревых электродов, расстояний между штырями и толщиной пьезоволокон, необходимо подбирать оптимальное постоянное напряжение для поляризации пьезофибера, чтобы не произошел пробой в структуре; 3) матрица пьезофибера должна обладать высокой диэлектрической проницаемостью.

Разработка технологии и исследование магнитопьезофибера является перспективным направлением в области создания новых видов МЭ структур для высокочувствительных сенсоров и измерительных систем, поскольку в МЭ структурах, где используется волокнистый материал, наблюдаются высокие значения МЭ эффекта [3]. Дальнейшая работа будет посвящена улучшению и доработке технологии создания пьезофибера и магнитопьезофибера, подробному экспериментальному и теоретическому исследованию данной МЭ структуры и развитию теоретических моделей и методов расчета для оптимизации характеристик магнитопьезофибера для его практического применения.

Список публикаций:

- [1] Bichurin M., Petrov R., Sokolov O., Leontiev V., Kuts V., Kiselev D., Wang Y. *Magnetolectric Magnetic Field Sensors: A Review // Sensors.* – 2021, 21. 6232.
- [2] Wu H., Tatarenko A., Bichurin M., Wang Y. *A multiferroic module for biomechanical energy harvesting // Nano Energy.* – 2021, 83. 105777.
- [3] Dong S., Zhai J., Li J., Viehland D., *Near-ideal magnetoelectricity in high-permeability magnetostrictive/piezofiber laminates with a (2-1) connectivity // Applied Physics Letters.* – 2006, 89. 252904.

# Структура и свойства $k\pi$ -скирмионов в неоднородных ферромагнитных пленках

Ильцова Галия Флюсовна

Вахитов Роберт Миннисламович, Солонецкий Ростислав Владимирович

Уфимский университет науки и технологий

Вахитов Роберт Миннисламович, д.ф.-м.н.

[galiya.siraeva2014@yandex.ru](mailto:galiya.siraeva2014@yandex.ru)

В последнее время наблюдается устойчивый интерес к изучению магнитных скирмионов: их возможных типов, свойств и магнитных материалов, в которых они стабилизируются. Он обусловлен их необычными спин-электронными свойствами [1], а также перспективами их применений в устройствах спинтроники и искусственных нейронных сетях. [2]. Впервые магнитные скирмионы были обнаружены в киральных магнетиках [3], в которых благодаря наличию взаимодействия Дзялошинского-Мория они образуют устойчивые состояния. Однако в таких магнетиках, в силу разных причин, возникли определенные трудности с устойчивостью магнитных скирмионов [4,5], в результате чего появился спрос на альтернативные методы их стабилизации в других материалах, в которых отсутствует взаимодействие Дзялошинского-Мория. Одним из возможных способов реализации такого подхода был предложен в работах [6], в которых было показано, что такими материалами могут являться ферромагнитные пленки с пространственно модулированной одноосной анизотропией. В дальнейшем было установлено, что магнитные скирмионы могут существовать в таких материалах в широком диапазоне изменения температур и магнитных полей. В большинстве последующих исследований под магнитными скирмионами, как правило, понимались вихреподобные неоднородности, в которых единичный вектор намагниченности  $\mathbf{m}=\mathbf{m}(r)$  поворачивается на  $180^\circ$  при его перемещении в радиальном направлении от центра ( $r = 0$ ) до периферии ( $r = R$ ) пленки ( $\pi$ -скирмионы). В то же время, появились исследования в которых предсказывалась возможность существования  $k\pi$ -скирмионов ( $k \in 1, 2, 3...$ ) [7].

В данной работе изучаются устойчивые состояния магнитных  $k\pi$ -скирмионов, образующихся на колумнарных дефектах типа «потенциальная яма» в одноосных ферромагнитных пленках [8]. Подобные исследования в некиральных магнетиках до недавнего времени практически не проводились, за исключением работы [9], в которых исследовалось влияние магнитного поля на  $k\pi$ -скирмионы, ( $k \in 2,3,4$ ), возникающие в магнитных нанодисках  $\text{Fe}_3\text{Sn}_2$ . В частности, были обнаружены устойчивые состояния  $2\pi, 3\pi$  и  $4\pi$ -скирмионов в исследуемых пленках. При этом была обнаружена следующая закономерность в появлении  $k\pi$ -скирмионов: чем больше размер диска, тем вероятнее обнаружить скирмион в них с большей величиной «закрутки» вектора намагниченности, т.е. величиной  $k$ . В качестве модели дефекта рассматривается структурная неоднородность магнетика, в которой материальные параметры  $P = \{A, K_u, M_s\}$ , изменяются скачком в области дефекта:

$$P = \begin{cases} P_1, r > R_0 \\ P_2, r \leq R_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $P_i = \{A_i, K_{u_i}, M_{s_i}\}$  — материальные параметры вне колумнарного дефекта ( $i = 1$ ) и в области дефекта ( $i = 2$ ). Здесь  $A$  — обменный параметр,  $K_u$  — константа одноосной анизотропии,  $M_s$  — намагниченность насыщения,  $R_0$  — радиус дефекта. При этом необходимо отметить, что все параметры, имеющие размерность длины приведены к величине  $\Delta_0 = \sqrt{A_1/K_{u1}}$ , где  $\Delta_0$  — характерный размер доменной границы в одноосных ферромагнетиках.

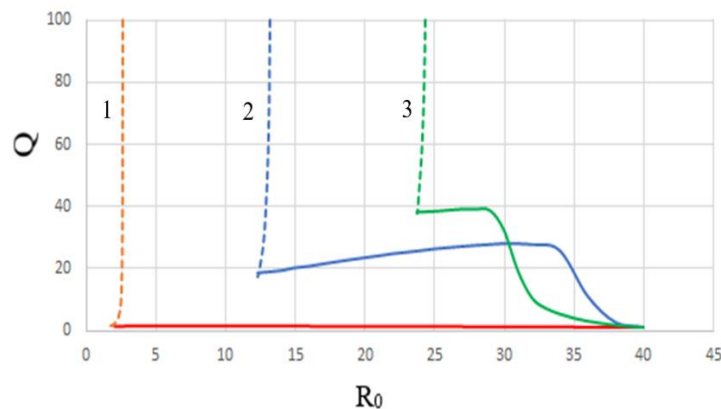


рис. 1. Диаграмма области устойчивости для 1-  $\pi$ -скирмиона (красная линия), 2 -  $3\pi$ -скирмиона (синяя линия), 3 -  $5\pi$ -скирмиона (зеленая линия) при следующих значениях материальных параметров  $K_{u2} = -2K_{u1}$ ,  $A_2 = A_1$ ,  $M_{s2} = M_{s1}$ .

Из приведенных расчетов структуры и устойчивости  $k\pi$ -скирмионов следует, что они могут существовать как устойчивые образования в магнитоодноосных пленках на колумнарных дефектах типа



потенциальная яма. Топология и размеры этих неоднородностей существенно зависят от характеристик дефекта ( $A_2$ ,  $K_{u2}$ ,  $M_{s2}$ ,  $R_0$ ) и прежде всего от его радиуса  $R_0$  и глубины потенциальной ямы  $K_{u2}$ . Можно отметить, что начальный профиль распределения намагниченности ( $R_0 < 0$ ) для всех трех типов  $k\pi$ -скирмионов ( $k \in 1,3,5$ ) совпадает вне зависимости от величины  $R_0$ . Исследования показывают, что энергетически более выгоден  $\pi$ -скирмион, а  $3\pi, 5\pi$ - скирмионы существуют как метастабильные состояния. Кроме того, построены диаграммы устойчивых состояний  $k\pi$ -скирмионов (рис 1.), при этом нижний порог устойчивости  $\pi$ -скирмионов относительно размеров дефекта начинается с малых  $R_0$  ( $R_0 \geq 1$ ),  $3\pi$ -скирмионов- с больших  $R_0$  ( $R_0 \geq 14$ ), а  $5\pi$ -скирмионов- с  $R_0 \geq 25$

Список публикаций:

- [1] A. Neubauer, C. Pfleiderer, B. Binz, A. Rosch, R. Ritz, P.G. Niklowitz, P. Boni, // *Phys. Rev. Lett.* 2009. 102.186602.  
 [2] M. Kläui, K. Everschor-Sitte, O. Lee, R. Msiska // *Appl. Phys. Lett.* 2023. 122. 260501.  
 [3] A. Bogdanov, A.; Hubert // *J. Magn. Magn. Mater.* 1994. 138. P. 255–269.  
 [4] F. Jonietz, S. Mühlbauer, C. Pfleiderer, et al. // *Science.* 2010. 330. P.1648–1651.  
 [5] F. Büttner, C. Moutafis, M. Schneider, et al. // *Nat. Phys.* 2015. 11. P. 225–228.  
 [6] P.M.Вахитов, Т.Б.Шанаева, Р.В.Солонецкий, А.Р.Юмагузин // *ФММ.2017.118.571*  
 [7] J. Hagemester, A. Siemens, L. Rózsa, E. Y. Vedmedenko, and R. Wiesendanger // *Phys. Rev.*2018. B 97, 174436  
 [8] R. M. Vakhitov, R.V. Solonetsky, A. A. Akhmetova // *J. Appl. Phys.* 2020. 128. 000000.  
 [9] J. Jiang, Y. Wu, L. Kong, Y. Wang, J. Li, Y. Xiong, J. Tang // *Acta Materialia.* 2021. 215. 117084.

## Комплексное исследование свойств замещенной никелевой шпинели, полученной по короткой технологической схеме

Карева Катерина Валерьевна<sup>1,2</sup>

Сураев Александр Сергеевич<sup>1</sup>, Труфанова Наталья Сергеевна<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Вагнер Дмитрий Викторович, к.т.н.

[katkareva1@gmail.com](mailto:katkareva1@gmail.com)

Магнитомягкие ферриты являются востребованными материалами для производства пассивных электронных компонентов, таких как планарные катушки индуктивности, фазовращатели, вентили, циркуляторы и др. Особенно активно используются ферритмагнетики со структурой шпинели из-за высокой температуры Кюри и наличия резонансов доменной структуры и естественного ферромагнитного резонанса в диапазоне высоких частот. От синтеза ферритов зависят их магнитные и структурные свойства, которыми определяется область практического применения материалов. В число распространенных методов синтеза входят керамическая технология [1], золь-гель горение [2], самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [3], метод химического соосаждения [4]. В серийном производстве наиболее часто используется именно многостадийная керамическая технология.

В данной работе проводились комплексные исследования ферритов-шпинелей  $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$  ( $x = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ ), изготовленных по короткой технологической схеме, предложенной в работе [5]. Структурные параметры и фазовый состав определяли при помощи автоматизированного дифрактометра ДРОН 2 УМ на фильтрованном кобальтовом излучении ( $CoK\alpha$ ). Исследование температуры Кюри проводили по методике, подробно описанной в работе [6]. Измерение петель магнитного гистерезиса проводили на импульсном магнитометре в полях до 6,5 кЭ при температуре 300 К. Принцип работы импульсного магнитометра и методика измерения представлены в работе [7]. Поля анизотропии определялись методом обнаружения сингулярных точек [8]. Размер частиц был оценен с помощью сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе Сохет EM-30Plus.

Рентгенофазовый анализ подтвердил однофазность всех полученных образцов. Величины областей когерентного рассеяния (ОКР) значительно не изменяются с увеличением содержания ионов цинка (ОКР  $\approx 129$  нм). Размер кристаллитов выше, чем при синтезе ферритов аналогичного состава, полученного методами золь-гель горения [9] и химического соосаждения [10]. На рисунке 1(а) приведен снимок частиц для феррита  $x = 0,3$ . Размер частиц для всех образцов ферритов не превышал 10 мкм.

Зависимости удельной намагниченности насыщения ( $\sigma_s$ ) и коэрцитивной силы ( $H_c$ ) от концентрации ионов цинка приведены на рис. 1(б). Значения  $\sigma_s$  увеличиваются с 56 до 87 Гс·см<sup>3</sup>/Г при  $x = 0,0$  и  $x = 0,4$ , соответственно. Значения  $H_c$  уменьшаются последовательно с 33 до 10 Э при увеличении концентрации ионов цинка  $x$  в составе ферритов. Изменение данных характеристик связаны с перераспределением ионов в тетраэдрической и октаэдрической подрешетках, что влияет на величины магнитных моментов в решетке.



Однако значения полей анизотропии  $H_a$  не претерпевают изменений при замещении ионов никеля ионами цинка (1230 Э). Значения температуры Кюри уменьшаются с 585 до 389 °С при замещении ионов никеля ионами цинка.

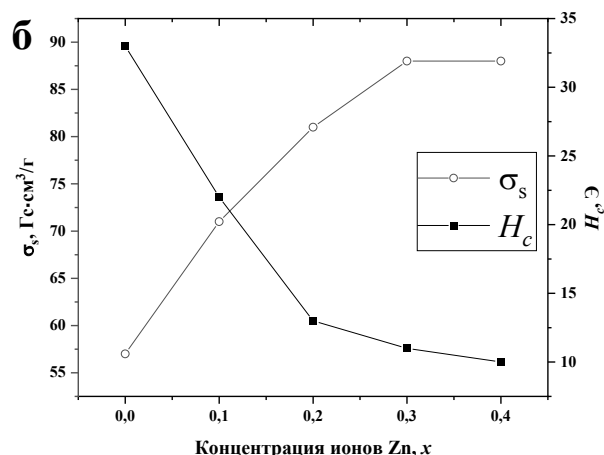
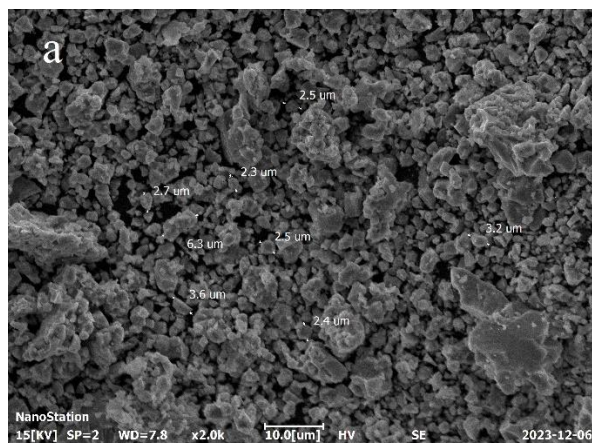


рис.1 (а) Изображение сканирующей электронной микроскопии образца  
(б) Зависимость магнитных характеристик от концентрации ионов цинка

Полученные значения магнитных и структурных характеристик хорошо согласуются с уже опубликованными данными, где проводился синтез ферритов другими методами, такими как химическое соосаждение [9] и СВС [10]. Вследствие чего можно сделать вывод о целесообразности применения короткой технологической схемы для изготовления шпинельных ферритов. Проведенные исследования могут помочь в выборе состава феррита для практического применения с учетом рабочего температурного диапазона и магнитных характеристик.

Авторы выражают благодарность доценту кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета Журавлеву Виктору Алексеевичу за проведение исследований температуры Кюри. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер гранта 23-29-00400, <https://rscf.ru/project/23-29-00400/> (дата обращения: 4 марта 2024 г.).

Список публикаций:

- [1] Lu X. et al. // *Micromachines*. 2024. Vol. 15(2). P. 215.
- [2] Dippong et al. // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13(24). P. 3096.
- [3] Журавлев В.А. и др. // *Изв. вузов. Физика*. 2012. Т. 55. № 8/2. С. 181-182.
- [4] Islam K. et al. // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10. P. 2297.
- [5] Канева И.И. // *Изв. вузов. Мат. Электрон. Техн.* 2014. Т. 66. № 2. С. 99–103.
- [6] Lysenko E.N. et al. // *Ceram. Int*. 2019. Vol. 45. P. 20148–20154.
- [7] Wagner D.V. // *Inventions*. 2023. Vol. 8. Iss. 1. P. 00026.
- [8] Asti G. et al. // *Phys. Rev. Lett*. 1972. Vol. 28. Iss. 24. P. 1584–1586.
- [9] Khan S.B. et al. // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9(7). P. 1024.
- [10] Houshiar M. et al. // *Mater. Res. Bull*. 2018. V. 98. P. 213–218.

## Перестраиваемый полосно-пропускающий СВЧ фильтр на магнитоэлектрических резонаторах

**Кафаров Руслан Гайдарович**

**Бельшев Андрей Александрович**

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Лобекин Вячеслав Николаевич*

*[evraudx14@gmail.com](mailto:evraudx14@gmail.com)*

Одним из перспективных направлений развития СВЧ-техники в настоящее время является разработка устройств на основе микроволнового магнитоэлектрического эффекта (МЭ). В таких устройствах реализуется перестройка параметров с помощью сдвига линии ферромагнитного резонанса (ФМР) под действием управляющего электрического поля. В качестве МЭ резонаторов используются феррит-сегнетоэлектрические структуры, например, из железо-иттриевого граната (ЖИГ) и цирконата-титаната свинца (ЦТС) (рис. 1),

помещаемые на микрополосковые линии (МПЛ), в связи с этим возникают ограничения в конструкции, которые необходимо учитывать при создании устройств такого типа [1].

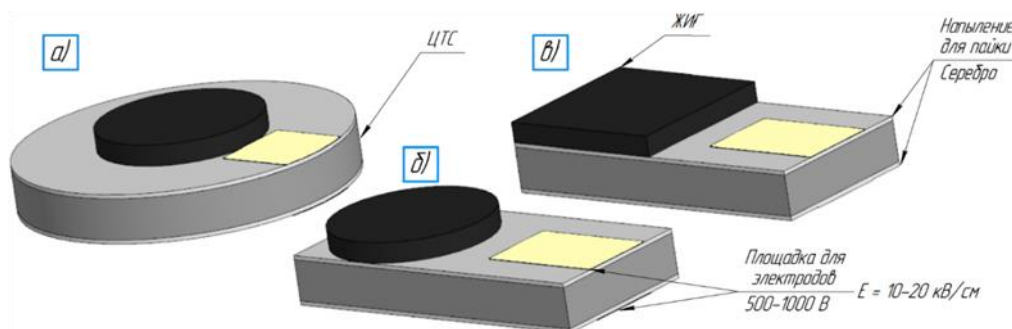


рис. 1. Варианты исполнения МЭ композитов ЖИГ-ЦТС: а) диск-диск,  $D_{m,p} = 2; 4$  мм; б) диск-квадрат,  $D_m = 2$  мм,  $A_p \times B_p = 2 \times 4$  мм; в) квадрат-квадрат,  $A_m \times B_m = 2 \times 2$  мм,  $A_p \times B_p = 2 \times 4$  мм.

При проектировании полосно-пропускающих фильтров (ППФ) сначала определяется число резонаторов. Однорезонаторные фильтры обладают низкими избирательностью и прямоугольностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), но просты в изготовлении. Очевидно, что увеличение числа МЭ резонаторов повышает вносимые потери и усложняет конструкцию, поэтому компромиссным вариантом, обеспечивающим приемлемые параметры, является двухрезонаторный ППФ на МПЛ. Быстрым и точным способом проектирования ППФ является компьютерное моделирование при помощи программ Ansys HFSS и AWR Microwave Office.

Следующим этапом является выбор типа ППФ. Синтезируем двухрезонаторный ППФ с центральной частотой (ЦЧ) 6 ГГц, шириной полосы пропускания (ПП) 100 МГц и волновым сопротивлением 50 Ом с учётом миниатюризации и минимальных вносимых потерь. Фильтр должен быть реализован на связанных МПЛ, чтобы осуществить частотную перестройку при помощи МЭ резонаторов, поэтому подойдут ППФ, например, на связанных линиях с краевой/концевой связью или шпилечного типа. Тип ППФ выбирается в зависимости от требований к АЧХ. Важно понимать, что величина зазоров МПЛ определяет вносимые потери, при этом зазоры должны быть достаточными для размещения в них МЭ резонаторов. К тому же, во избежание электрического пробоя, МЭ резонаторы должны быть достаточно удалены друг от друга. Для получения ранее заданной АЧХ фильтры с краевой/концевой связью подходят слабо из-за больших размеров и потерь, низких прямоугольности АЧХ и избирательности, поэтому выберем фильтр шпилечного типа (рис. 2).

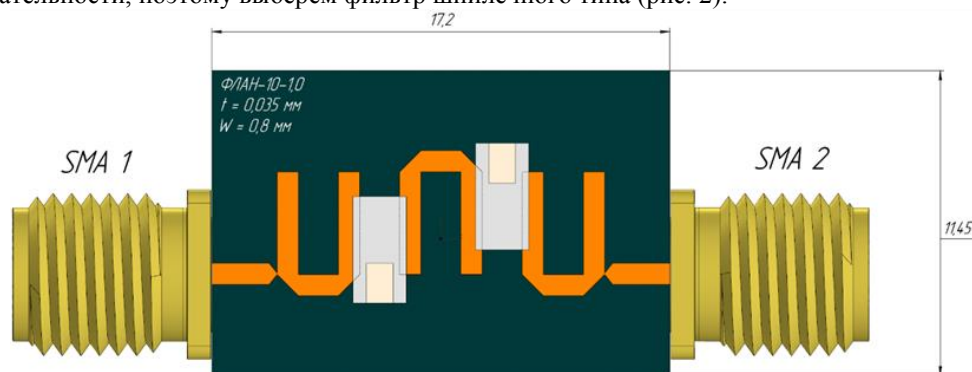


рис. 2. Спроектированный в AWR Microwave Office МЭ ППФ шпилечного типа.

Диэлектрическая подложка выбирается с высоким значением  $\epsilon$ , например, ФЛАН-10-1,0 или аналоги Rogers. В остальном синтез МЭ ППФ не отличается от синтеза обычного ППФ. Было проведено электромагнитное моделирование для получения S-параметров фильтра (рис. 3).

Ширина ПП составила 97,5 МГц, ослабление на ЦЧ 5,98 ГГц равно -2,8 дБ. Коэффициент отражения S11 на ЦЧ -13 дБ. Волновое сопротивление 49,9 Ом. Ближайшая высшая гармоника возникает на частоте 10,4 ГГц, ослабление -2,5 дБ, ширина гармоники по уровню -3 дБ составила 1 ГГц. В дальнейшем планируется проведение эксперимента с разработанным МЭ ППФ для определения оптимальной геометрии МЭ резонаторов и использования его в приёмно-передающем модуле [2].

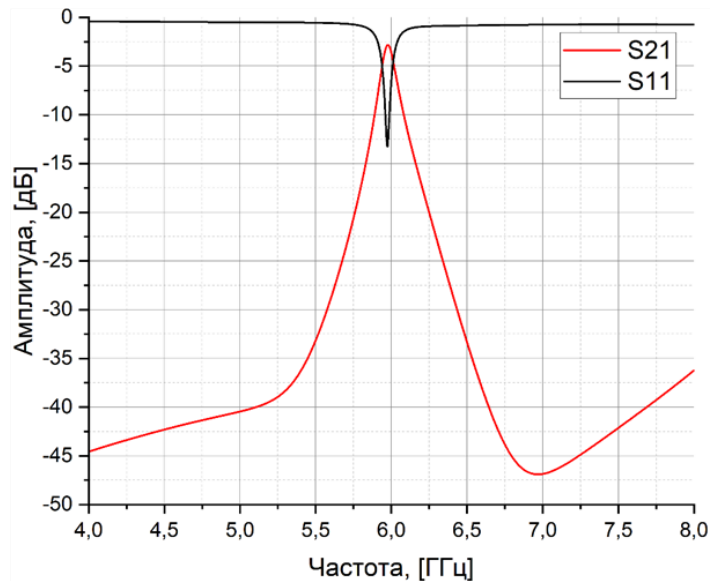


рис. 3. S-параметры ППФ без МЭ резонаторов, полученные в Ansys HFSS.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 24-15-20044.

Список публикаций:

[1] Лобекин В.Н., Кафаров Р.Г., Татаренко А.С., Муравьев В.Е. Исследование связи резонаторов микроволнового магнитоэлектрического полосового фильтра с помощью компьютерного моделирования // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2022. №3(128). С.96-101.

[2] Бичурин М.И., Петров Р.В., Татаренко А.С. Магнитоэлектрические устройства для ФАР // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 4.

## Магнитоэлектрический датчик магнитного поля на основе магнитоэлектрически-пьезоэлектрической структуры

**Козонов Александр Юрьевич**

*Сыроваева Кристина Андреевна, Семенова Ксения Витальевна*

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.*

*[s241716@std.novsu.ru](mailto:s241716@std.novsu.ru)*

Любые датчики, и в том числе датчики магнитного поля стремятся к высокой чувствительности для последующего более широкого их применения. Одной из областей, нуждающихся в высокочувствительных датчиках магнитного поля, является медицина. Это связано с тем, что многие живые организмы генерируют довольно слабые магнитные поля порядка 10 пТл.

Известный магнитоэлектрический (МЭ) эффект, наблюдаемый в магнитоэлектрически-пьезоэлектрических структурах и заключающийся в возникновении электрической поляризации во внешнем магнитном поле и в намагничивании во внешнем электрическом поле мог бы решить проблему повышения чувствительности датчиков магнитного поля. Подобные устройства на основе МЭ композитов показывали более высокую чувствительность к магнитному полю, чем их аналоги на основе других материалов.

Например, широкополосный низкочастотный датчик магнитного поля, состоящий из стопы склеенных между собой многослойных пьезоэлектрических элементов и магнитоэлектрических (Ni) пластин с отрицательной магнитоэлектрической с практически неизменной чувствительностью датчика в 20 В/Тл в широком диапазоне частот обеспечивает нижний порог измерения магнитного поля  $5 \cdot 10^{-8}$  Тл [2].

Также из [1] известно об опытах с датчиками тороидальной структуры, которые отличились повышенной чувствительностью к магнитному полю. В данном эксперименте в качестве магнитоэлектрической фазы использовался Метглас, а в качестве пьезоэлектрической – пластины цирконат-титаната свинца (ЦТС). Эти же материалы использовались автором тезиса в собственных экспериментах. Так, на рисунке 1 изображён график зависимости МЭ напряжения на электродах датчика с тороидальной структурой Метглас-ЦТС-Метглас от частоты поля. Максимальное выходное напряжение составило порядка 133 мВ на частоте 195 кГц.

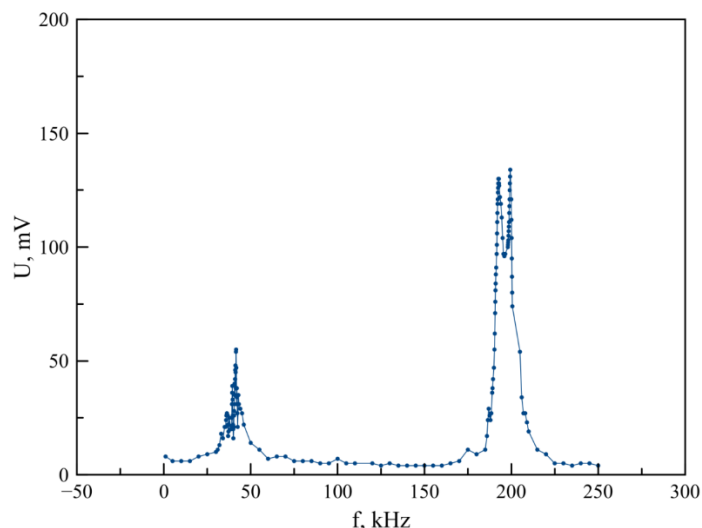


рис. 1.: график зависимости МЭ напряжения от частоты

Автором тезиса и коллегами также была разработана полезная модель МЭ датчика с несимметричной структурой. Повышение чувствительности датчика достигалось за счёт того, что структура находилась в режиме магнитоакустического резонанса, объединяющего крутильную моду и ферромагнитный резонанс. [3]

Также предлагается проводить эксперименты с датчиками, структура которых изображена на рисунке 2. Повышение объёмной доли магнитострикционной компоненты в данном случае может поспособствовать усилению резонансного сигнала и снижению резонансной частоты. Согласно выполненным расчётам датчик с пьезоэлектрической фазой в виде материала PMN-PT должен показать более высокую чувствительность, чем датчик с той же фазой в виде ЦТС.

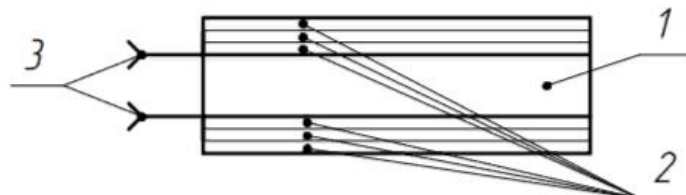


рис. 2: структура датчика магнитного поля: 1 – пластина ЦТС или P-MN-PT; 2 – ленты Метгласа; 3 – электроды.

Эксперименты с МЭ структурами для создания новых датчиков магнитных полей представляют большой практический интерес. Поиск новых материалов и способов повышения чувствительности датчиков к магнитному полю приведёт к усовершенствованию современного оборудования, в том числе и медицинского, рассчитанного на слабые поля.

Список публикаций:

[1] *Magnetolectric Vortex Magnetic Field Sensors Based on the Metglas/PZT Laminates* / Do Thi Huong Giang [et al.]. *Sensors* 2020, 20, 2810; doi:10.3390/s20102810

[2] Пат. 118071 Российская Федерация, МПК G01R 33/02. Широкополосный низкочастотный датчик магнитного поля / Фетисов Ю. К., Чашин Д. В., Итальянцев А. Г., Шульга Ю. В.; патентообладатели: Общество с ограниченной ответственностью Научно-технологический Центр "АГИТАЛ", Закрытое акционерное общество "НПЦ СпецЭлектронСистемы". – № 2012113943/28; заявл. 11.04.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19.

[3] Пат. 216369 Российская Федерация, МПК G01R 33/02. Магнитоэлектрический датчик магнитного поля / Лобекин В. Н., Бичурин М. И., Козонов А. Ю., Кафаров Р. Г.; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого». - № 2022130534; заявл. 24.11.2022; опубл. 31.01.2023, Бюл. № 4.

## Магнитные свойства многослойных наноструктур на основе Co и Ni

Косырев Леонид Николаевич

МАОУ СШ № 72 М. Н. Толстихина, г. Красноярск

Косырев Николай Николаевич, к.ф.-м.н.

[leonidkosyrev752@gmail.com](mailto:leonidkosyrev752@gmail.com)

В связи с бурным развитием нанотехнологий в последние годы актуальна проблема контроля физических свойств получаемых наноматериалов. Так, тонкопленочные гетероструктуры с чередованием полупроводниковых и магнитных слоев представляют огромный интерес для спинтроники. На современном этапе развития нанотехнологий и материаловедения стоит задача создания совершенных по структуре полупроводниковых и магнитных материалов, что обусловлено высокой чувствительностью электронных свойств материала к дефектам и неоднородностям структуры. Это связано с тенденциями развития твердотельной микроэлектроники, направленными на повышение степени интеграции и переходом к использованию квантово-размерных явлений и двумерных кристаллов.

Структуры с чередованием различных магнитных материалов интересны своими необычными свойствами, например наличием перпендикулярной магнитной анизотропии. Перпендикулярная магнитная анизотропия (англ. perpendicular magnetic anisotropy, PMA) - это явление, характеризующееся предпочтительной ориентацией намагниченности в пленках в направлении, перпендикулярном плоскости пленки. Она играет важную роль в различных магнитных устройствах, таких как магнитно-туннельные структуры (magnetic tunnel junctions) и устройства памяти. Однако, создание стабильной перпендикулярной анизотропии в тонких пленках может быть вызовом из-за физических и химических свойств материалов и процессов при их изготовлении. Поэтому исследование и разработка новых материалов и методов для достижения эффективной перпендикулярной магнитной анизотропии остаются активной областью исследований в современной нанотехнологии и магнетизме.

В данной работе методом магнитооптического эффекта Керра исследованы двухслойные системы Ni/Co с различными толщинами слоев (рисунок 1)

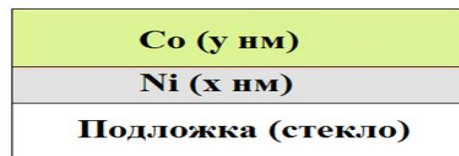


рис.1. Схема исследуемых образцов. Толщины слоев Ni X=2-20 нм  
Co Y=3-13 нм

На рисунке 2 представлены петли гистерезиса, снятые при различных температурах. По оси ординат отложен сигнал магнитооптического эффекта Керра, который пропорционален намагниченности той части образца, которую захватывает зондирующий пучок. Учитывая диаметр светового пятна 50 мкм, а также глубину проникновения примерно 50 Нм (на данной длине волны), можно оценить объем материала, намагниченность которого мы измеряем. В данном случае он составляет  $\approx 9,8 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$

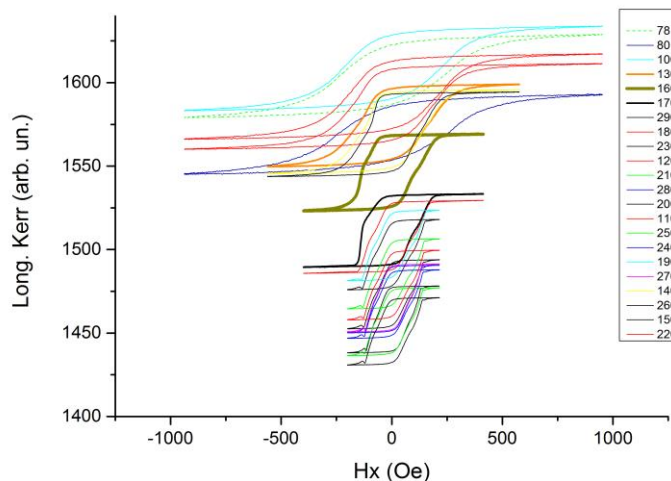


рис.2. Петли гистерезиса в структуре Ni20/Co13



Анализируя получившуюся систему графиков, можно отметить, что чем больше температура, тем петля гистерезиса ниже на графике и в целом, поведение намагниченности согласуется с данными для пленок Co [1]. Но при этом критической точкой является 160К, при которой происходит резкий скачок на следующую петлю, а из этого следует что в данном эксперименте эффект Керра, а значит и намагниченность исследуемого образца, не всегда пропорциональна температуре. Похожий эффект наблюдался в работе [2], где измеряли намагниченность двухслойных систем Co/CoO. Это означает, что у нас на поверхности Co образовался слой оксида кобальта, который и влияет на магнитные свойства.

Список публикаций:

[1] Кобяков А.В., Турпанов И.А., Патрин Г.С., Руденко Р.Ю. Структурные и магнитные свойства систем Al2O3/Ge-p/Al2O3/Co // Журнал технической физики. 2019. Том 89, № 2. С. 268-273

[2] F. Radu, M. Etzkorn, R. Siebrecht et al. Interfacial domain formation during magnetization reversal in exchange-biased CoO/Co bilayers // PHYSICAL REVIEW B 67, 134409 (2003)

## Исследование магнитоэлектрических градиентных структур PZT/Metglas/Ni

Марков Иван Юрьевич

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мурза Имамович, д.ф.-м.н.

[ivanmarckov02@mail.ru](mailto:ivanmarckov02@mail.ru)

Известно, что использование градиентных магнитоэлектрических (МЭ) структур позволяет исключить необходимость в использовании дополнительных элементов, таких как постоянные магниты, обеспечивающих подмагничивание магнитоэлектрического материала, в разрабатываемых устройствах на основе МЭ композитов, что приводит к существенному снижению веса, габаритов и энергопотребления [1].

В градиентных МЭ структурах внутреннее магнитное поле смещения на практике создается разделением магнитоэлектрической фазы на две области с различными значениями намагниченности насыщения для создания градиента намагниченности [2].

В данном сообщении мы исследовали МЭ структуру PZT/Metglas/Ni с целью создания внутреннего магнитного поля, обеспечивающего максимальный МЭ эффект, путем подбора необходимой толщины никелевого компонента. В нашем эксперименте были использованы 4 прямоугольных образца с градиентной структурой (рис.1) на основе пьезоэлектрической пластины PZT (ЦТС-19), магнитоэлектрических слоев материала Metglas (аморфный магнитомягкий сплав АМАГ225, ПАО «Мстатор», Россия) толщиной 21 мкм и никелевой фольги толщиной 8 мкм, соединенных клеем БФ-2. Толщина PZT  $t_p = 0,5$  мм, толщина Metglas  $t_{m2} = 63$  мкм (3 слоя). Суммарная толщина никеля  $t_{m1}$  для разных образцов составляла 16, 24, 40 и 56 мкм (2, 3, 5 и 7 слоев соответственно). Длина и ширина МЭ композитов 30x10 мм.

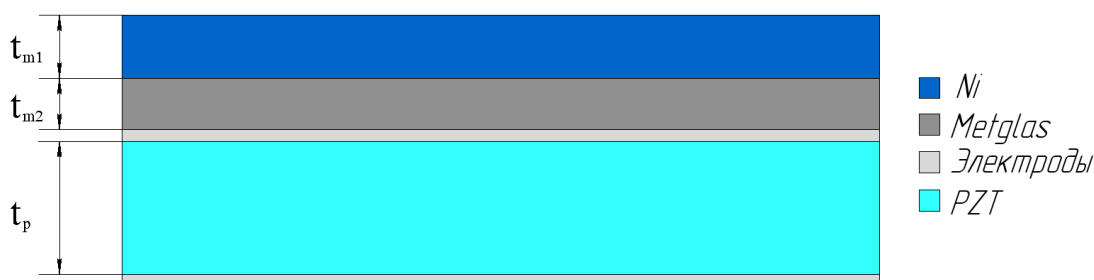


рис.1. Несимметричная градиентная структура PZT/Metglas/Ni

На (рис.2) представлена экспериментальная зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты направленного вдоль длины переменного магнитного поля амплитудой 1 Э для образцов с различной толщиной никеля при отсутствии внешнего подмагничивающего поля.

Из полученных графиков видно, что максимальный МЭ эффект наблюдается при толщине никеля 16 мкм и составляет 2,56 В/(см·Э) на частоте 52,7 кГц. Полученный максимум МЭ эффекта при 16 мкм никеля соответствует такой же величине МЭ эффекта, измеренной при внешнем подмагничивающем поле 10 Э в структуре PZT/Metglas без никеля. При дальнейшем увеличении толщины никеля МЭ коэффициент по напряжению уменьшается, а резонансная частота смещается вправо.

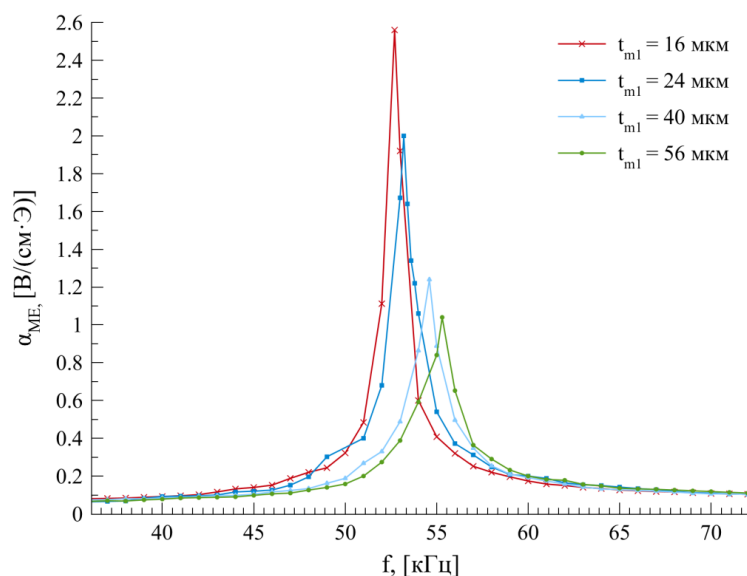


рис.2. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты переменного магнитного поля для образцов с различной толщиной слоя никеля при отсутствии внешнего магнитного поля

Из-за потерь, вызванных большим количеством диэлектрических прослоек клея БФ-2 между фазами, МЭ эффект значительно уменьшается. Поэтому для оптимизации МЭ эффекта в композитах, сделанных по клеевой технологии, необходимо использовать токопроводящий клей, чтобы снизить потери.

В настоящий момент нами ведётся разработка токопроводящего клея на основе порошков никеля и Metglas для создания межфазных соединений. Преимуществом использования такого клея для создания МЭ композитов будет отсутствие диэлектрических прослоек между различными фазами и, как следствие, увеличение МЭ коэффициента по напряжению. Планируется оптимизация исследованных градиентных структур с использованием нового токопроводящего клея.

Список публикаций:

- [1] Bichurin M., Petrov R., Leontiev V., Sokolov O., Turutin A., Kuts V., Kubasov I., Kislyuk A., Temirov A., Malinkovich M., Parkhomenko Y. *Self-Biased Bidomain LiNbO<sub>3</sub>/Ni/Metglas Magnetolectric Current Sensor*. *Sensors*. 2020. 20(24). 7142.  
 [2] Mandal S., Sreenivasulu G., Petrov V., Srinivasan G. *Magnetization-graded multiferroic composite and magnetolectric effects at zero bias*. *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*. 84 (2011).

## Наночастицы семейства ферритов $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ : магнитные свойства и применение

Сердюк Анастасия Андреевна

Светлицкий Евгений Сергеевич

Сибирский федеральный университет

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Ирина Самсоновна Эдельман

[onyoursde4@gmail.com](mailto:onyoursde4@gmail.com)

За последние десятилетия интенсивно развивались методы синтеза наноразмерных материалов, что значительно расширило возможности получения наноферритов различных контролируемых составов. Возможность замещать одни катионы другими в широком диапазоне концентраций позволяет радикально изменять свойства ферритов со структурой шпинели. Семейство замещенных ферритов с общей формулой  $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  представляет собой яркий пример изменений свойств от магнито-жесткого до магнито-мягкого материала при изменении  $x$ . Крайние члены этого ряда  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  ( $x=0$ ) и  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  ( $x=1$ ) являются обращенными шпинелями. Целью настоящей работы является изучение влияния состава феррита, изменяющегося при постепенном замещении магнитного иона кобальта немагнитным ионам магния, на магнитные свойства образцов  $\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  ( $x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$ ), определение величины магнитной анизотропии и установление закономерностей, связывающих температурные и концентрационные зависимости коэрцитивной силы со степенью замещения кобальта магнием. В работе также проведено исследование возможности использования данного семейства неперо-ферритов в качестве адсорбентов органических красителей. Тема очистки водных ресурсов от растворенных в ней загрязняющих компонентов, является актуальной и востребованной в современном индустриальном мире.

Зависимости намагниченности образцов от внешнего магнитного поля показывают переход от магнито-жесткого к магнито-мягкому материалу по мере увеличения значения  $x$ : остаточная намагниченность ( $M_s$ ) и коэрцитивная сила ( $H_c$ ) уменьшаются по мере замещения ионов Co ионами Mg. При понижении температуры  $M_s$ , коэрцитивная сила  $H_c$  и степень прямоугольности петель гистерезиса всех образцов возрастают в несколько раз. При этом характер изменения  $H_c$  одинаков для всех образцов, кроме образца с  $x=1.0$ , для которого увеличение  $H_c$  незначительно и линейно по температуре. Сильное возрастание  $H_c$  приводит к тому, что в использованных полях при понижении температуры остаются только частные циклы, как показано на рис. 1 а для образца с  $x = 0.6$ , и в образцах с  $x = 0.0, 0.2, 0.4$  и  $0.6$  магнитное насыщение в максимальном магнитном поле 15 кЭ при понижении температуры не достигается. Это обуславливает кажущееся уменьшение намагниченности при понижении температуры (рис. 1б, кривые 2 и 3). Таким образом, экспериментальное определение  $M_s$  при низких температурах в используемых магнитных полях становится невозможным для образцов 1-4, и для оценки величины  $M_s$  при 0 К ( $M_{s0}$ ) был использован закон Блоха:

$$M_s = M_{s0} \cdot (1 - B \cdot T^{3/2}) \quad (1)$$

где  $B$  – параметр материала. Значение  $M_{s0}$  для всех образцов было получено экстраполяцией к 0 К участка экспериментальной кривой  $M_s(T)$ , который удовлетворяет закону Блоха, как это показано на рис. 1б. Для расчёта константы анизотропии при конечной температуре был использован закон приближения намагниченности к насыщению

$$M(H) = M_s \left( 1 - \frac{4}{15} \left( \frac{K_{eff}}{M_s H} \right)^2 \right) \quad (2)$$

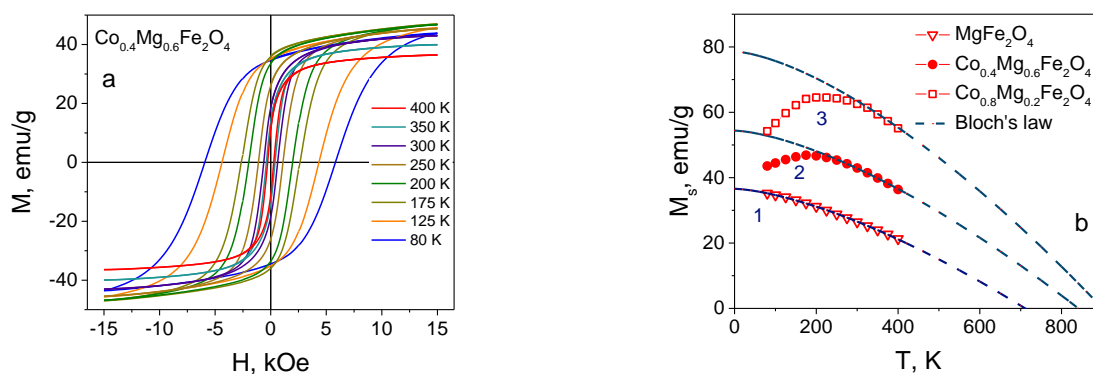


рис 1. а - Полевые зависимости намагниченности при различных температурах для образца с  $x=0.6$ ; б - зависимости  $M_s(T)$  для образцов  $MgFe_2O_4$ ,  $Co_{0.4}Mg_{0.6}Fe_2O_4$  и  $Co_{0.8}Mg_{0.2}Fe_2O_4$  (кривые 1, 2, 3), точки - эксперимент, штриховые линии - закон Блоха, сплошные – экстраполяция кривых к 0 К по закону Блоха.

Рассчитанные таким образом значения константы эффективной анизотропии  $K_{eff}$  при 0 К зависят от  $x$  аналогично зависимости  $H_c$  от  $x$ .  $K_{eff}$  образцов 1-5 монотонно уменьшается от  $5.27 \cdot 10^6$  до  $1.29 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>3</sup>, несколько быстрее, чем по линейному закону, но даже для наименьшей использованной концентрации кобальта ( $1 - x = 0.2$ ) оставалось очень большим, практически, на 2 порядка величины превышая  $K_{eff}$  ( $4 \cdot 10^4$  эрг/см<sup>3</sup>) образца, не содержащего кобальта. Таким образом, магнитные свойства синтезированных наночастиц определяются ионами  $Co^{2+}$  до самой низкой использованной концентрации ( $1 - x = 0.2$ ).

Исследование адсорбционных свойства были проведены на двух модельных органических красителях: катионного (Метилен синий (МВ)) и анионного (Конго красный (CR)) типов. Адсорбционная емкость рассчитывалась по изменению интенсивности максимумов в спектрах оптического поглощения растворов красителей до и после взаимодействия с красителями на длинах волн 664 нм для МВ и 500 нм для CR, обработка экспериментальных результатов выполнена в рамках подходов, представленных в [1]. Образец  $CoFe_2O_4$  показал высокую величину и скорость поглощения катионного красителя МВ. По мере увеличения  $x$  наночастицы предпочитали поглощать анионный краситель CR. Полученный результат показал, что электростатическое взаимодействие поверхности наночастиц и растворенных красителей не является доминирующим в механизме адсорбции в исследуемом случае. Кинетические кривые хорошо описываются моделью псевдо-второго порядка, а изотерма моделью моно-слойной адсорбции Ленгмюра.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №23-22-10025, <https://rscf.ru/project/23-22-10025/>, Красноярского краевого фонда науки.

Список публикаций:

[1] Lin Ch.-R. et al. // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. 2371.



## Исследование формирования магнитоэлектрических структур методом магнетронного распыления

Сыроварова Кристина Андреевна

Козонов Александр Юрьевич, Семенова Ксения Витальевна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

[crstnaa@icloud.com](mailto:crstnaa@icloud.com)

На протяжении длительного времени ученые, проводя научные исследования магнитоэлектрического эффекта в композитных слоистых структурах, пользовались клеевой технологией для создания композиционных магнитоэлектрических структур [1].

С целью получения более качественной магнитоэлектрической структуры, исключая клеевые слои, следует рекомендовать метод магнетронного распыления.

Магнетронные распылительные системы (МРС) позволяют распылять практически все виды материалов, в том числе материалы, которые используются в качестве компонентов для создания магнитоэлектрических структур.

В работе [2] исследованы структурные, электрические и оптические свойства тонких графитоподобных пленок, полученных на кристаллическом кремнии и кварце методом магнетронного распыления при температурах подложки в диапазоне от 320 до 620°C. Из анализа установлено, что с ростом температуры подложки происходит увеличение характерного размера кристаллитов, уменьшение концентрации структурных дефектов и содержания аморфного углерода в фазовом составе пленок.

В работе [3] методом реактивного магнетронного распыления составных мишеней были синтезированы пленки титаната железа (ильменита), при содержании кислорода до 35 % были сформированы пленки с атомарно гладкой поверхностью и резкой границей раздела пленка-подложка толщиной ~ 100 нм, состоящие из  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  в структуре шпинели и оксидов титана  $\text{Ti}_3\text{O}_5$ . Предложенная методика позволяет формировать пленки с размерами зерен 1—2 нм и регулярными порами размером ~ 3 нм.

В данный момент ведутся подготовительные эксперименты на установке EPOS-PVD-DESK-PRO по распылению никеля на пьезокерамическую подложку из ЦТС для создания магнитоэлектрической структуры Ni-PZT.

Целью эксперимента является получение двухслойной МЭ структуры и исследование ее свойств.

На рис. 1 представлена структура, которая будет получена в результате эксперимента.

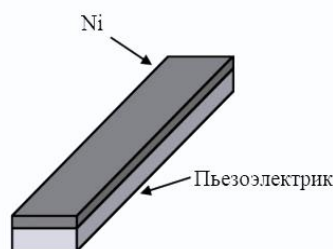


рис. 1 МЭ структура

Проведенные исследования распыления материалов, которые могут использоваться как компоненты многослойных структур, позволяют рассматривать метод магнетронного распыления в качестве перспективного способа формирования магнитоэлектрических композитов. Поиск новых методов и способов повышения создания качественных магнитоэлектрических структур позволит усовершенствовать существующие магнитоэлектрические устройства.

Список публикаций:

[1] Bichurin M., Petrov V. // *Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, Volume 201, 2014, 108p.*

[2] Виноградов А. Я., Грудинкин С. А., Беседина Н. А., Коняхин С. В., Рабчинский М. К., Эйдельман Е. Д., Голубев В. Г. // *Структура и свойства полученных методом магнетронного распыления тонких графитоподобных пленок. Физика и техника полупроводников, 2018, том 52, вып. 7.*

[3] Логачева В. А., Бабушкина Е. В., Герасименко Ю. В., Максименко А. А., Афонин Н. Н., Ховив А. М. // *Формирование тонких пленок титаната железа методом реактивного магнетронного распыления в плазме (Ar+O2) составных металлических мишеней Fe-Ti. Конденсированные среды и межфазные границы, Том 12, №4, 2010.*

## Влияние термообработки на структуру и свойства наночастиц $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{2.45}\text{O}_4$

Торопова Екатерина Сергеевна

Светлицкий Евгений Сергеевич

Сибирский федеральный университет

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Эдельман Ирина Самсоновна

[topotova2002@gmail.com](mailto:topotova2002@gmail.com)

Ферриты на основе кобальта со структурой шпинели и общей формулой  $\text{Fe}_x\text{Co}_{3-x}\text{O}_4$ , привлекают особое внимание, благодаря высокой магнитной анизотропии кобальта и возможности изменять их свойства за счет варьирования относительных концентраций магнитных компонент.  $\text{FeCo}_2\text{O}_4$ , является важным ферромагнитным материалом с высокой температурой Кюри, большой коэрцитивной силой и значительной по величине намагниченностью насыщения. Большое влияние на физические свойства оказывает распределение магнитных катионов по тетраэдрическим и октаэдрическим позициям в структуре шпинели. Перераспределение катионов по позициям возможно при изменении технологических условий синтеза, например, температуры и времени термообработки. В последние годы классические применения ферритов дополнились их использованием в качестве адсорбентов различных красителей и ионов металлов, загрязняющих воду. Развитая площадь поверхности, легко адсорбирующая многие вещества, и простота магнитного извлечения из среды делают наноразмерные ферриты перспективными материалами в этой области.

Целью данной работы являлось выявление закономерностей изменения структурных и магнитных свойств наночастиц феррита состава  $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{2.45}\text{O}_4$  в зависимости от температуры и времени выдержки при определенных условиях синтеза. В работе также представлены результаты исследований адсорбционных свойств наночастиц по отношению к органическим красителям, катионному – метиленовый синий (methylene blue, MB) и анионному – Конго красный Congo red, CR). Рентгеновские дифрактограммы образцов приведены на рис.1. Положение и набор рефлексов соответствуют структуре шпинели. Установлено, что средний размер кристаллитов растет по мере увеличения температуры отжига – приблизительно в 5 раз при изменении температуры от 500 до 800 °С, в тоже время длительность термообработки не оказывает существенного влияния на размеры кристаллитов

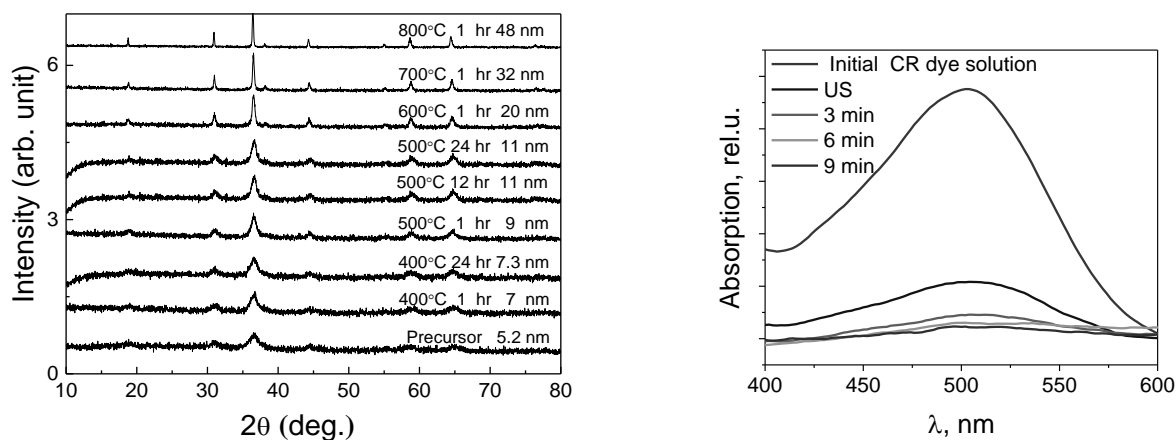


рис.1. Рентгеновские дифрактограммы образцов  $\text{Fe}_{0.55}\text{Co}_{2.45}\text{O}_4$ , полученных при различных температурах отжига и времени выдержки (слева); спектры оптического поглощения раствора красителя Конго красного в зависимости от времени взаимодействия с частицами исходного образца (прекурсора).

Для изучения магнитных свойств был использован магнитный круговой дихроизм (МКД) – магнитооптический эффект, величина которого прямо пропорциональна намагниченности образца. При всех режимах термообработки образцы исследованного состава демонстрируют МКД конечной величины, что свидетельствует о том, что во всех случаях наночастицы являются магнито-упорядоченными. В спектрах МКД образцов, подвергнутых отжигу при более высоких температурах, преобладает относительно узкий интенсивный положительный пик, центрированный вблизи 1.8 эВ, интенсивность которого возрастает приблизительно линейно по температуре, также как размер кристаллитов. Параметры второго положительного более широкого пика также, как и отрицательного пика в районе 2.5 эВ, сильнее зависят от температуры отжига. При этом основные особенности спектров позволяют сделать предположение, что они связаны с ионами кобальта и их изменения являются результатом перераспределения ионов  $\text{Co}^{2+}$  по октаэдрическим и тетраэдрическим позициям в структуре шпинели. Адсорбционные свойства наночастиц ферритов определялись по изменению интенсивности максимумов в спектрах оптического поглощения растворов красителей на длинах

волн 664 нм для MB и 500 нм для CR до и после взаимодействия с наночастицами. Выявлена предпочтительная адсорбция анионного красителя. В качестве примера на рис. 1 справа приведены спектры оптического поглощения красителя CR в зависимости от времени взаимодействия с частицами. Видно, что за 9 мин взаимодействия наночастиц и раствора красителя степень удаления красителя составляет более 90 %, что проявляется в осветлении красителя и резком уменьшении полосы поглощения раствора красителя.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №23-22-10025, <https://rscf.ru/project/23-22-10025/>, Красноярского краевого фонда науки.

Список публикаций:

[1] Xie J. et al. // *Ceramics International*. 2021. Т. 47. №. 9. С. 11993.

## 7 - Оптика и спектроскопия

Арсентьев Сергей Сергеевич, ст. лаборант-исследователь  
Нижний Новгород, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, отделение нелинейной динамики и оптики

**Исследование магнитохирального эффекта в кристаллах лангасита и катангасита в двухпроходной оптической схеме**

Новиков Михаил Афанасьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [underslim1@gmail.com](mailto:underslim1@gmail.com) стр. 138

Арсентьев Сергей Сергеевич, ст. лаборант-исследователь  
Нижний Новгород, Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, отделение нелинейной динамики и оптики

**Исследование фотоиндуцированных эффектов в кристаллах фототермическим интерференционным методом**

Новиков Михаил Афанасьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [underslim1@gmail.com](mailto:underslim1@gmail.com) стр. 139

Бабинович Анастасия Евгеньевна, 3 курс  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физико-технический факультет, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

**Индикатрисы рассеяния света для ледяных атмосферных агрегатов, полученные в рамках приближения физической и геометрической оптики**

Коношонкин Александр Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [anastasiababinovich@gmail.com](mailto:anastasiababinovich@gmail.com) стр. 140

Бакина Ксения Андреевна, аспирант, инженер-исследователь  
Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, физико-математический институт

**Методика определения распределения сил осцилляторов на примере оксида скандия  $Sc_2O_3$**

e-mail: [tylxen@gmail.com](mailto:tylxen@gmail.com) стр. 141

Бетлени Павел Игоревич, аспирант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Оптическая система для выполнения точных двухкубитовых вентилей с нейтральными атомами**

Бетеров Илья Игоревич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [pavl90bar@gmail.com](mailto:pavl90bar@gmail.com) стр. 142

Боронин Виктор Александрович, 2 курс  
Челябинск, Институт электрофизики УрО РАН

**Зависимость энергии Урбаха оптических керамик  $0.5at\%Er:YAG$  и  $3at\%Tm:YAG$  от температуры**

Подгорнов Федор Валерьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [boronin1996vitek@mail.ru](mailto:boronin1996vitek@mail.ru) стр. 143

Брущенко Альберт Игоревич, магистрант 2 года обучения  
Казань, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики

**Алгоритм “unfolding-synthesis” в некорректных задачах обработки мёссбауэровских спектров**

Дулов Евгений Николаевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [greatvalorlight@mail.ru](mailto:greatvalorlight@mail.ru) стр. 145

Войлошников Алексей Данилович, 3 курс  
Томск, Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий

**Симметрия потенциальных функций молекул  $XYZZ$  ( $C_{3v}$ ) и  $XYZZ_2$  ( $C_{2v}$ )**

Уленев Олег Николаевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [adv10@tpu.ru](mailto:adv10@tpu.ru) стр. 145

Гаппель Екатерина Витальевна, 4 курс  
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, факультет физики  
**Исследование абсолютных интенсивностей спектра поглощения сероводорода H<sub>2</sub>MS (M = 32, 33, 34) в районе первой декады**  
Бехтерева Елена Сергеевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [katya\\_gappel@mail.ru](mailto:katya_gappel@mail.ru) стр. 147

Ивченко Илья Дмитриевич, м.н.с.  
Челябинск, Институт электрофизики УрО РАН, лаборатория нелинейной оптики  
**Определение фокусного расстояния сфокусированного пучка с дислокацией волнового фронта по дифракции на прямоугольном экране**  
Бибикова Эвелина Анатольевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ivchenkoid@susu.ru](mailto:ivchenkoid@susu.ru) стр. 148

Кузьминов Данила Андреевич, 4 курс  
Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий  
**Случайные резонансы в многоатомных молекулах: H<sub>2</sub>C=CD<sub>2</sub>, состояния (v<sub>2</sub>=1, A<sub>1</sub>)/(v<sub>7</sub>=2, A<sub>1</sub>)/(v<sub>8</sub>=2, A<sub>1</sub>)**  
Бехтерева Елена Сергеевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [dak97@tpu.ru](mailto:dak97@tpu.ru) стр. 149

Макаров Павел Андреевич, с.н.с.  
Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, физико-математический институт  
**Программные пакеты для расчёта и анализа XAFS-спектров**  
e-mail: [makarovpa@ipm.komisc.ru](mailto:makarovpa@ipm.komisc.ru) стр. 151

Назаров Равшанжон Холикбердиевич, аспирант 3 года обучения  
Санкт-Петербург, Национальный исследовательский университет ИТМО, физический факультет  
**Связанные состояния в континууме в цепочке из керамических дисков со структурным беспорядком**  
Кондратенко Зарина Фаильевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [r.nazarov@metalab.ifmo.ru](mailto:r.nazarov@metalab.ifmo.ru) стр. 152

Петрова Ольга Викторовна, н.с.  
Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, физико-математический институт  
**Синхротронное излучение: ультрамягкая спектроскопия поглощения биологических объектов и композитов на их основе**  
e-mail: [teiou@mail.ru](mailto:teiou@mail.ru) стр. 154

Рутковский Валерий Олегович, 2 курс  
Сыктывкар, Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина, Коми научный центр УрО РАН, ИТНиИТ, физико-математический институт  
**Определение оптических констант фуллеренов в области аномальной дисперсии методом Крамерса-Кронига**  
Сивков Виктор Николаевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [valeriy.rutkovskiy@mail.ru](mailto:valeriy.rutkovskiy@mail.ru) стр. 155

Сидько Сергей Сергеевич, 4 курс  
Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий  
**Новая модель эффективного дипольного момента молекул типа аксиальной симметрии C<sub>3v</sub>: приложения к исследованию абсолютных интенсивностей в полосе ν<sub>6</sub> молекулы CH<sub>3</sub><sup>35</sup>Cl**  
Уленев Олег Николаевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [sss60@tpu.ru](mailto:sss60@tpu.ru) стр. 156

Скандаков Роман Николаевич, инженер-исследователь  
Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, физико-математический факультет  
**Комплексные исследования нанопористого кремния, полученного путём травления с добавлением 5 % раствора йода**  
Сивков Виктор Николаевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [scanick@yandex.ru](mailto:scanick@yandex.ru) стр. 157

Хамуд Гайсаа Аббас, аспирант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический  
**Спектральная зависимость фототока в МДП-структурах на основе нестехиометрических германо-силикатных плёнок**  
Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [k.gaisaa@gsnu.ru](mailto:k.gaisaa@gsnu.ru) стр. 157

Худякова Юлия Вадимовна, 4 курс  
Томск, Томский политехнический университет, Инженерная школа ядерных технологий  
**Исследование субмиллиметрового спектра высокого разрешения молекулы  $\text{CH}_2\text{Z}^5\text{Cl}_2$**   
Громова Ольга Васильевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [yvh7@tpu.ru](mailto:yvh7@tpu.ru) стр. 159

Чэн Юйчжу, 1 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Фототок в PIN структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния с включениями нанослоёв германия**  
Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [chengyuzhu9@gmail.com](mailto:chengyuzhu9@gmail.com) стр. 160

Яковлев Лев Алексеевич, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Исследование структуры основанной на переходе металл-диэлектрик в диоксиде ванадия**  
Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [liakovlev@sfedu.ru](mailto:liakovlev@sfedu.ru) стр. 162

Янина Ирина Юрьевна, доцент  
Саратов, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Институт физики  
**Зависимость дозы введения апконверсионных наночастиц с изменениями оптических параметров опухоли**  
e-mail: [irina-yanina@yandex.ru](mailto:irina-yanina@yandex.ru) стр. 163

# Исследование магнитохирального эффекта в кристаллах лангасита и катангасита в двухпроводной оптической схеме

Арсентьев Сергей Сергеевич

Смирнова Евгения Александровна, Хышов Андрей Александрович, Новиков Михаил Афанасьевич

Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Новиков Михаил Афанасьевич, к.ф.-м.н.

[underslim1@gmail.com](mailto:underslim1@gmail.com)

Особый интерес в области оптических явлений, обусловленных проявлением пространственной дисперсии, представляет их исследование при наличии внешних воздействий, таких как, например, магнитное поле [1].

В присутствии магнитного поля в нецентросимметричных средах возникает магнитохиральный эффект, который, в частности, проявляется в невзаимном магнитооптическом линейном двупреломлении [2]. В настоящей работе исследуется явление магнитохирального эффекта в кристаллах лангасита и катангасита при приложении к ним поперечного переменного магнитного поля.

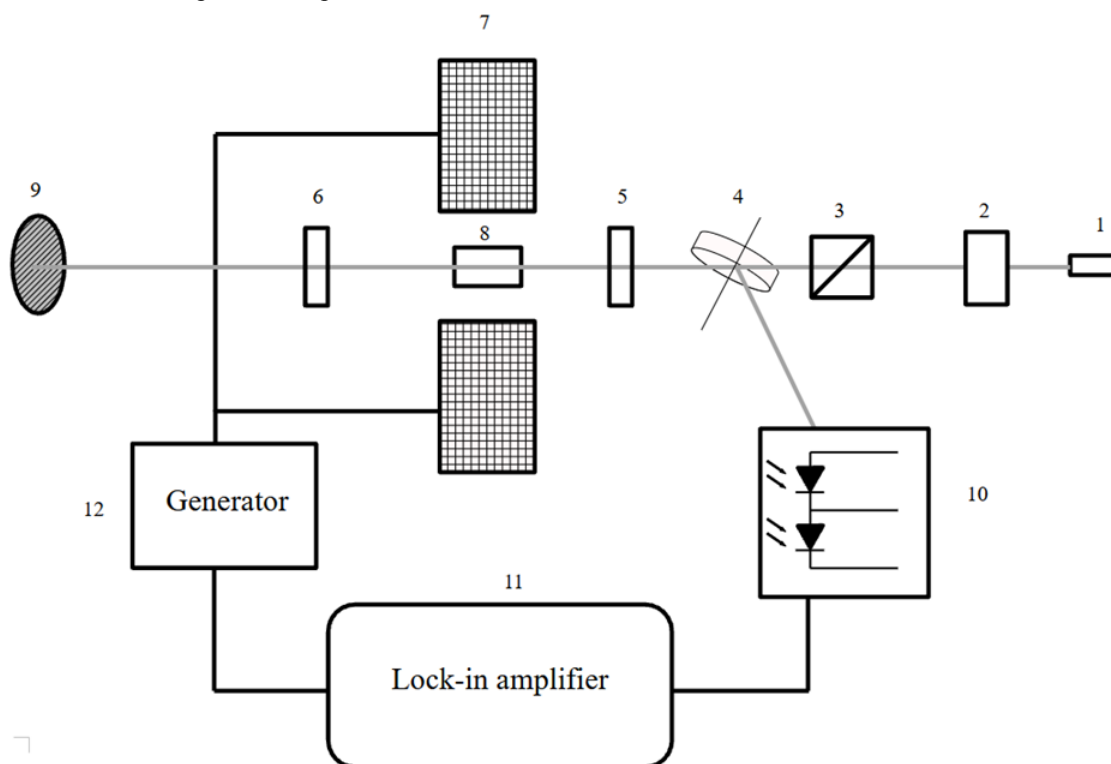


рис.1. Схема установки для исследования магнитохирального эффекта: 1 – лазер 532 нм, 2 – оптический изолятор, 3- призма Глана, 4 – изотропный делитель, 5, 6 – фазовые пластинки  $\lambda/4$ , 7 – обкладки магнита, 8 – кристалл, 9 – зеркало, 10 – фотодиодный детектор, 11 – синхронный детектор, 12 – генератор синуса

Для измерения предложена схема на основе двухпроводной оптической системы. Достигнута чувствительность  $5 \cdot 10^{-8}$  рад. Показано, что использование изотропного делителя, близкого к углу Брюстера, позволяет увеличить отношение переменной составляющей измеряемого сигнала к постоянной составляющей в 100 раз. Измерена величина магнитохирального эффекта в кристалле лангасита  $\Delta n / H^{ext} = (2.4 \pm 0.7) \cdot 10^{-14} \text{ Э}^{-1}$  и с чувствительностью  $5 \cdot 10^{-8}$  рад обнаружен сигнал в кристалле катангасита.

Список публикаций:

[1] Агранович В. М., Гинзбург В. Л. Кристаллооптика с учётом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1965.

[2] Геликонов Г. В., Новиков М. А. // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74, № 6. С. 1123.

## Исследование фотоиндуцированных эффектов в кристаллах фототермическим интерференционным методом

Арсентьев Сергей Сергеевич

Смирнова Евгения Александровна, Хышов Андрей Александрович, Новиков Михаил Афанасьевич

Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

Новиков Михаил Афанасьевич, к.ф.-м.н.

[underslim1@gmail.com](mailto:underslim1@gmail.com)

В данной работе предложен оригинальный метод измерения объемных фотоиндуцированных эффектов в кристаллах на основе интерферометра Жамена-Лебедева. Интерферометр представляет собой прибор, оптическая схема которого представлена на рисунке 1.

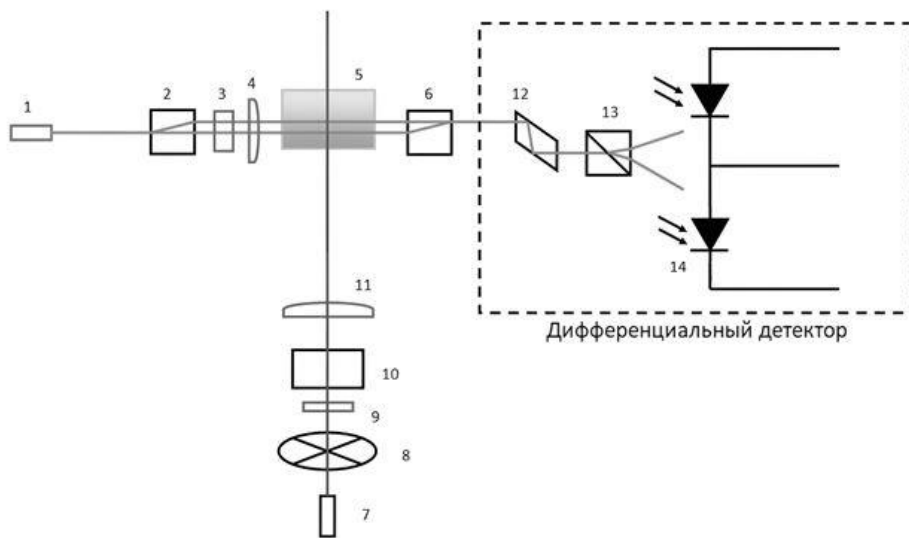


рис.1. Схема интерферометра для исследования объемного поглощения: 1 – зондирующий лазер, 3, 6 – расщепители, 13 – призма Волластона, 4 – ротатор на  $90^\circ$ , 2 и 11 – линзы, 5 – исследуемый кристалл, 7 – лазер накачки, 8 – механический прерыватель, 9 – пластинка  $\lambda/4$ , 10 – поляризатор, 12 – ромб Френеля, 14 – фотодиоды

Метод обладает высокой чувствительностью и возможностью прецизионного сканирования всего объема кристалла за счет малых диаметров зондирующего пучка и пучка накачки. Выявлена возможность применения данного метода к измерению многих линейных и нелинейных фотоиндуцированных эффектов. Показана возможность измерения коэффициента объемного поглощения среды.

Проведены измерения на кристаллических образцах KDP. Результаты показаны на рисунке 2.

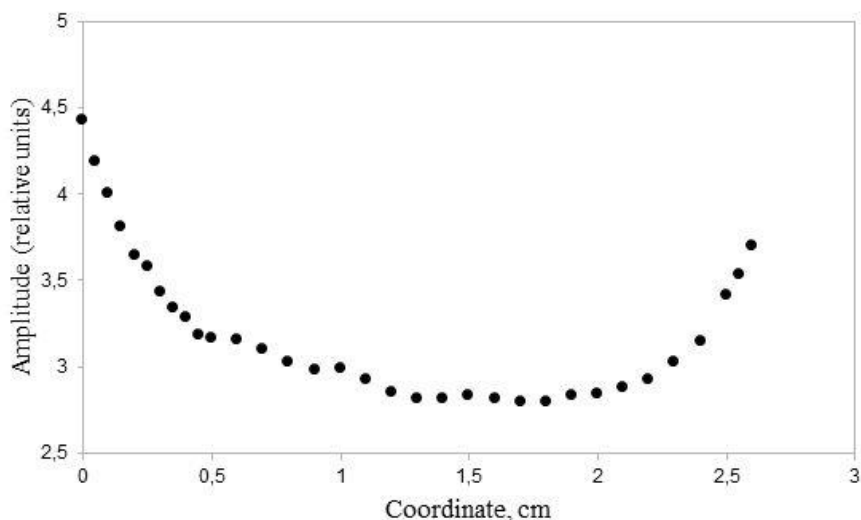


рис.2. Экспериментальная зависимость амплитуды сигнала от положения пучков в кристалле (X-скан)



## Индикатрисы рассеяния света для ледяных атмосферных агрегатов, полученные в рамках приближения физической и геометрической оптик

Бабинович Анастасия Евгеньевна<sup>1,2</sup>

Шишко Виктор Андреевич<sup>1,2</sup>, Тимофеев Дмитрий Николаевич<sup>2</sup>

Национальный исследовательский Томский государственный университет<sup>1</sup>,

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН<sup>2</sup>

Коношонкин Александр Владимирович<sup>1,2</sup>, д.ф.-м.н.

[anastasiababinovich@gmail.com](mailto:anastasiababinovich@gmail.com)

Перистые (кристаллические) облака, располагающиеся преимущественно в умеренных широтах и в полярных регионах Земли, на высотах 6-12 км, являются существенным фактором неопределенности в исследовании климата планеты. Размеры ледяных частиц, из которых состоят кристаллические облака, варьируются от 10 до 1000 мкм, а геометрическая форма в своей основе имеет вид гексагональной призмы. В отличие от сферических частиц жидко-капельных облаков, изучать процесс рассеяния света на кристаллических частицах достаточно сложно в силу разнообразия форм и фактора пространственной ориентации. Агрегаты кристаллических частиц, которые составляют существенную фракцию частиц в кристаллических облаках, по-прежнему остаются малоизученными из-за того, что принципиально отличаются от единичных частиц. Частицы, из которых они состоят, могут отличаться по количеству, размеру, форме, степени разреженности и взаимному расположению.

Под агрегатом понимается частица, состоящая из нескольких частиц, касающихся друг друга в одной или множестве точек. Частицы считаются неподвижными относительно друг друга, и, когда агрегат вращается, все частицы вращаются одновременно. Было получено подтверждение гипотезы о том, что агрегаты кристаллов рассеивают свет аналогично одиночным хаотически ориентированным кристаллам, из которых они состоят. Что в свою очередь позволило значительно продвинуться в области исследования оптических свойств агрегатов. Данная работа посвящена исследованию оптических характеристик агрегатов атмосферных ледяных частиц и их отличий от характеристик одиночных частиц.

Типичной формой агрегатов, встречающихся в кристаллических облаках, являются «bullet-rosette» (рис.1). Метод физической оптики ограниченно применим к таким типам частиц, в силу того, что вычислительная сложность метода сильно возрастает с количеством граней и размером частиц. Поэтому, в первом приближении, агрегаты частиц можно рассчитать в рамках приближения геометрической оптики.

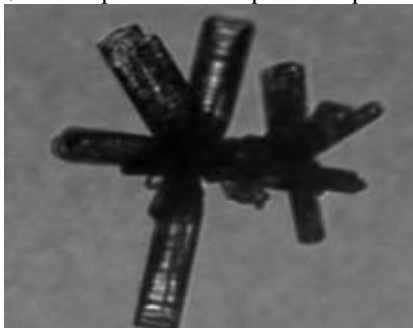


рис.1 Снимок агрегата типа «bullet-rosette»

Метод физической оптики основан на алгоритме трассировки пучков, который похож на алгоритм трассировки лучей, но работает с плоскопараллельными оптическими пучками. В этом алгоритме частица, рассеивающая свет, состоит из граней, состоящих из вершин с трехмерными координатами. Алгоритм разбивает свет, падающий на грани, на пучки. Эти пучки распространяются в частице и могут быть многократно разделены на преломленные и отраженные пучки, прежде чем они покинут частицу и рассеются. Метод физической оптики рассчитывает рассеянное поле в ближней зоне в рамках приближения геометрической оптики, а в дальней зоне – в рамках приближения физической оптики. Однако расчет дифракции для каждого рассеянного луча – очень затратная операция, особенно для случая произвольно ориентированных частиц в облаке. Больше всего время расчета в методе физической оптики возрастает с увеличением количества граней в частице. Поэтому в первую очередь матрица рассеяния света агрегатов рассчитывается в приближении геометрической оптики.

В рамках геометрической оптики были рассчитаны матрицы рассеяния света для агрегатов типа «bullet-rosette», а также агрегатов, в которых в качестве базовых частиц были использованы гексагональный столбик и пластинка (рис. 2). Количество частиц варьировалось от 1 до 9 (от 1 до 6 для «bullet-rosette»).



рис.2 Геометрические модели агрегата состоящего из столбиков и пластинок (расположенных как компактно, так и некомпактно), и агрегата типа «bullet-rossette».

Использовались следующие размеры базовых частиц: высота 100 мкм, диаметр основания 70 мкм (для столбика); высота 16 мкм, диаметр основания 100 мкм (для пластинки); высота 100 мкм, диаметр 42 мкм; угол пика – 20 градусов (для bullet). Рассчитывалась полная матрица рассеяния в рамках однократного рассеяния, для случая хаотической пространственной ориентации частиц (около 5 млн. ориентаций), с показателем преломления 1,3116. Первый элемент матрицы ( $M_{11}$ ) соответствует индикатрисе рассеяния света, остальные элементы матрицы описывают поляризационные характеристики света.

Результаты численного исследования подтвердили гипотезу, о том, что агрегат частиц рассеивает свет подобно входящему в его состав отдельному кристаллу для целого ряда форм агрегатов. Было установлено, что отношение  $M_{11}/S$  слабо меняется в зависимости от числа частиц в агрегате  $N$ , за исключением случая компактных агрегатов пластинок. Здесь  $S$  – геометрическое сечение рассеяния агрегата.

Таким образом, получен ценный результат, позволяющий вместо ресурсоемкого расчета всего многообразия атмосферных агрегатов, получить решение на основе решения для входящих в его состав одиночных частиц и геометрического сечения рассеяния, которые очень легко поддаются расчету по формуле (1).

$$M_{11}^{agr} = M_{11}^{sing} \cdot S, \quad (1)$$

где  $M_{11}^{agr}$  и  $M_{11}^{sing}$  – индикатрисы рассеяния света агрегата и отдельной частицы, соответственно.

Список публикаций:

- [1] Характеристики обратного рассеяния света для типичных моделей атмосферных агрегатов в рамках приближения физической и геометрической оптики/В.А. Шишко, А.Е. Бабинович, Д.Н. Тимофеев, А.В. Коношонкин, Н.В. Кустова// Материалы 21-й международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса" - Москва, 2023. - С. 61.
- [2] Коношонкин А. В., Кустова Н. В., Шишко В. А., Тимофеев Д. Н., Ткачев И. В., Бакуте Е., Бабинович А. Е., Zhu X., Wang Zhenzhi. Характеристики обратного рассеяния света на полых ледяных гексагональных столбиках для построения оптической модели перистых облаков. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 12. С. 1013–1019.
- [3] Сравнение характеристик рассеяния света на хаотически и квазигоризонтально ориентированных атмосферных ледяных кристаллах/ Н.В. Кан, Д.Н. Тимофеев, А.В. Коношонкин, А.Е. Бабинович// Юбилейная XXX конференция Аэрозоли Сибири. - Томск, 2023 - с. 7.

## Методика определения распределения сил осцилляторов на примере оксида скандия $Sc_2O_3$

**Бакина Ксения Андреевна**

*Сивков Виктор Николаевич, Некипелов Сергей Вячеславович, Петрова Ольга Викторовна,  
Скандаков Роман Николаевич*

*Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр» УрО РАН  
[tylxen@gmail.com](mailto:tylxen@gmail.com)*

В современных исследованиях наноструктур, неорганических материалов и биологических объектов широко используются методы ультрамягкой рентгеновской абсорбционной спектроскопии, которые включают в себя анализ спектральных зависимостей сечений поглощения в области ближней тонкой структуры рентгеновских спектров поглощения (near edge X-ray absorption fine structure, NEXAFS) и связанных с ними сил осцилляторов. Силы осцилляторов рентгеновских переходов представляют собой фундаментальные характеристики электронной структуры вещества, которые играют важную роль при описании формирования резонансной структуры рентгеновских спектров поглощения.

В данной работе рассматриваются проблемы, возникающие при выполнении абсолютных измерений спектральных зависимостей сечений поглощения и определении распределений сил осцилляторов в области NEXAFS на примере оксида скандия  $Sc_2O_3$ . Исследования рентгеновских спектров поглощения оксида скандия  $Sc_2O_3$  проводились на канале НаноФЭС Курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ-Курчатов, г. Москва, Россия). Для измерения сечений поглощения в области NEXAFS использовался метод квантового

выхода рентгеновского фотоэффекта, который был осуществлён путём регистрации полного электронного выхода (total electron yield, TEY) с поверхности исследуемого образца. Для подавления уровня длинноволнового немонахроматического рассеянного фона и излучения кратных порядков дифракции в диапазоне энергий квантов от 450 до 900 эВ использовался титановый фильтр (Ti-фильтр), который был установлен на металлической сетке.

С применением методики измерения сечений поглощения методом TEY с учётом аппаратных искажений и немонахроматического фона, описанной подробно в работе [1], были получены спектральные зависимости сечения поглощения  $\sigma(E)$  в области 2р-края поглощения оксида скандия  $Sc_2O_3$ , что позволило определить распределение сил осцилляторов. Для приведения зависимостей  $\sigma(E)$  к абсолютным единицам использовались данные сечений поглощения из таблиц Хенке.

Список публикаций:

[1] Sivkov D., Petrova O., Mingaleva A., Ob'edkov A., Kaverin B., Gusev S., Vilkov I., Isaenko S., Bogachuk D., Skandakov R., Sivkov V., Nekipelov S. // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. № 374.

## **Оптическая система для выполнения точных двухкубитовых вентилей с нейтральными атомами**

**Бетлени Павел Игоревич**

*Новосибирский государственный университет*

*Бетеров Илья Игоревич, к.ф.-м.н.*

[pav190bar@gmail.com](mailto:pav190bar@gmail.com)

Реализация квантового компьютера – одна из интереснейших задач современной физики. В последнее время наблюдается значительный прогресс в реализации квантовых вычислений с использованием в качестве кубитов переходов Джозефсона в сверхпроводниках, фотонов и ультрахолодных ионов.

Ультрахолодные нейтральные атомы – физическая платформа для реализации квантовых вычислений, преимущество которой заключается в практически неограниченном масштабировании благодаря идентичности атомов, захваченных в массивы оптических дипольных ловушек [1-2]. Эксперименты по захвату атомов в оптические дипольные ловушки проводятся в условиях сверхвысокого вакуума (давление не более  $10^{-10}$  мм.рт.ст.), для этого используются специальные вакуумные камеры или ячейки.

Основной проблемой квантовых вычислений с нейтральными атомами является реализация двухкубитовых вентилей [1]. Для этого происходит кратковременное возбуждение атомов в высоковозбужденные (ридберговские) состояния, поскольку дальнедействующие диполь-дипольные взаимодействия ридберговских атомов позволяют получить их перепутанные состояния. Для возбуждения ридберговских атомов используется двух-фотонная схема возбуждения с комбинацией излучения с длинами волн 480 нм и 780 нм.

Для захвата и возбуждения атомов применяют фокусирующую оптику, как правило, используют много линзовые объективы, которые размещают снаружи вакуумной камеры, или асферические линзы, размещаемые внутри вакуумной камеры [3-4]. Однако конструкции с объективами снаружи вакуумной камеры вносят ограничения на максимальный размер вакуумной камеры и требуют учитывать при разработке объектива толщину стекла окна вакуумной камеры, а конструкции с асферическими линзами усложняют оптический доступ к облаку холодных атомов и могут создавать паразитные электрические поля.

В работе была разработана схема объектива с числовой апертурой 0,39 и рабочим отрезком 19 мм для размещения внутри вакуумной камеры. Схема объектива приведена на рис. 1. Объектив состоит из 4 линз диаметром 25,4 мм, обозначенных как А, В, С, D, выбранных из каталога Thorlabs [5], а также изготовленной из стекла BK-7 менисковой линзы Е с радиусами кривизны оптических поверхностей 19 мм и 29,9 мм и толщиной 4 мм. За счет уменьшения диаметра менисковой линзы до 21 мм обеспечивается лучший оптический доступ к области лазерного возбуждения. Объектив оптимизирован для излучения с длиной волны 850 нм, с помощью которого формируются оптические дипольные ловушки.

Оптическая схема объектива может быть адаптирована для различных длин волн, в том числе и для длины волны 480 нм, которая используется для ридберговского возбуждения. Подстройка осуществляется изменением расстояний между линзами А-В и В-С. Объектив, оптимизированный на длину волны 850 нм, используется также для фокусировки второй компоненты ридберговского возбуждения с длиной волны 780 нм.

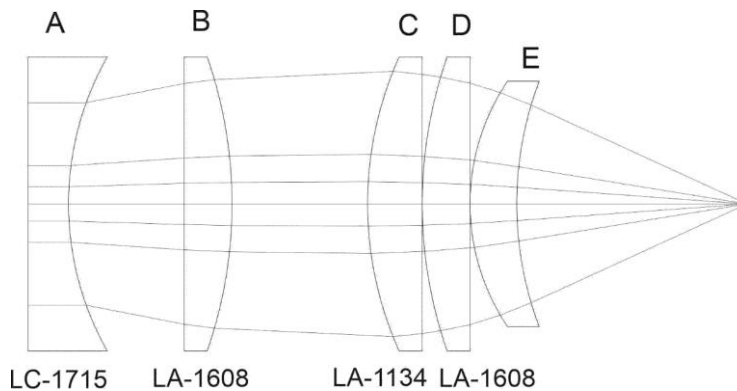


рис. 1. Оптическая схема объектива для установки внутри вакуумной камеры. Названия линз приведены в соответствии с каталогом компании Thorlabs.

Таким образом, была предложена схема малогабаритного объектива с числовой апертурой 0,39 для установки внутри вакуумной камеры. Такое размещение позволяет использовать его с крупногабаритными вакуумными камерами. За счет рабочего отрезка 19 мм по сравнению с асферическими линзами обеспечивается лучший оптический доступ для охлаждающих лазерных пучков.

Список публикаций:

- [1] Saffman, M. // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2003. Т. 49. № 20. С. 202001.  
 [2] Рябцев И. И., Бетеров И. И., Третьяков Д. Б., Энтин В. М., Якишина Е. А. // *УФН.* 2016. Т. 186. № 2. С. 206–219.  
 [3] H. Levine, A. Keesling, G. Semeghini et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2019. Т. 123. № 17. С. 170503.  
 [4] C. J. Picken, R. Legaie, and J. D. Pritchard // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Т. 111. № 16. С. 164102.  
 [5] Каталог Thorlabs. URL: <https://www.thorlabs.com>.

## Зависимость энергии Урбаха оптических керамик 0.5at%Er:YAG и 3at%Tm:YAG от температуры

**Боронин Виктор Александрович<sup>1,2</sup>**

Подгорнов Федор Валерьевич<sup>2</sup>, Кундикова Наталия Дмитриевна<sup>1,2</sup>

Иванов Максим Геннадьевич<sup>1</sup>

Институт электрофизики УрО РАН<sup>1</sup>

Южно-Уральский государственный университет<sup>2</sup>

Подгорнов Федор Валерьевич, к.ф.-м.н.

[boronin1996vitek@mail.ru](mailto:boronin1996vitek@mail.ru)

Алюмоиттриевый гранат (YAG) – кристаллический материал, в состав которого входит оксид иттрия и оксид алюминия. Керамики на основе алюмоиттриевого граната являются диэлектриками (ширина запрещенной зоны 6,5 эВ), обладают высокой механической прочностью, термической и химической стойкостью, а в случае выполнения ряда условий [1] и высокой прозрачностью. В случае допирования редкоземельными ионами керамики YAG демонстрируют люминесценцию в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах [2] и могут быть использованы в лазерах, светодиодах и устройствах отображения информации. Для оценки возможностей использования YAG, допированного редкоземельными элементами, необходимо знать параметры запрещенной зоны, такие как энергия запрещенной зоны и энергия Урбаха, характеризующая энергетический беспорядок на краях зон полупроводника, а также энергия электрон-фононного взаимодействия.

Целью данного исследования является идентификация зависимости энергии Урбаха от температуры для оптических керамик 0.5at%Er: YAG и 3at%Tm: YAG.

Спектральные характеристики исследовались с помощью двухлучевого спектрофотометра Agilent Cary 300 в широком температурном диапазоне (-120<sup>0</sup>С + 50<sup>0</sup>С).

В исследуемых керамиках в соответствии с теорией Таука ширина запрещенной зоны определяется следующим выражением:

$$\alpha = \frac{\beta}{hv} (hv - E_g)^{1/2} \quad (1)$$

где  $\beta$  – константа, называемая параметром затухания, независящая от энергии,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны,  $h\nu$  – энергия фотона. Используя данную формулу были получены графики  $\alpha^2 \sim h\nu$ , из которых определялась ширина запрещенной зоны  $E_g$  (рис. 1) и её зависимость от температуры для керамики 0.5at%Er: YAG и 3at%Tm: YAG.

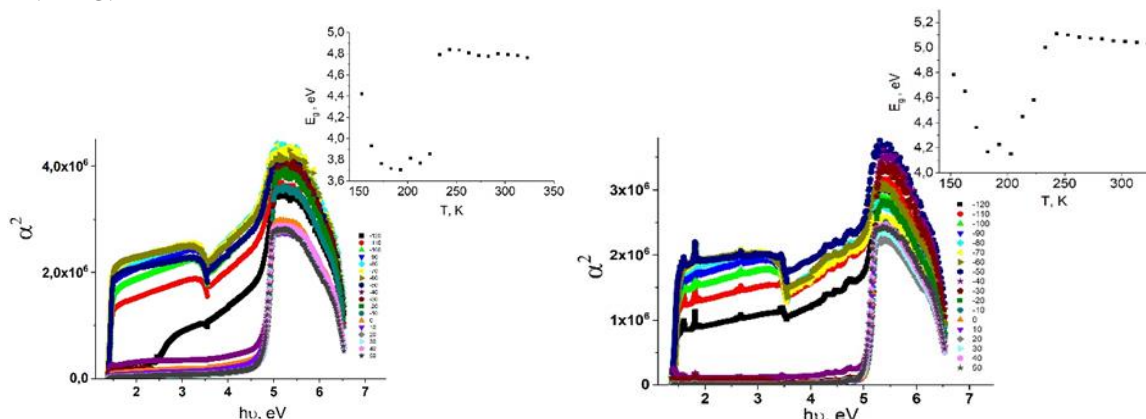


рис1. Зависимость квадрата коэффициента пропускания от энергии фотона и ширины запрещенной зоны от температуры для образцов 0.5at%Er: YAG (слева) и 3at%Tm: YAG (справа)

При переходе электронов из верхней части валентной зоны в нижнюю часть зоны проводимости возникает беспорядок, электроны сталкиваются с плотностью своих состояний  $\rho(h\nu)$ , которые приводят к попаданию в энергетическую щель. Данная область  $\rho(h\nu)$ , находящаяся в запрещенной зоне, называется хвостом Урбаха, а ширина этой зоны называется энергией Урбаха  $E_U$  [2]. Энергию Урбаха можно найти из спектра оптического поглощения материала в соответствии с формулой:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_U}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha_0$  константа,  $E_U$  – энергия Урбаха.

Экспериментально энергия  $E_U$  находилась из зависимости  $\ln(\alpha) \sim h\nu$ . Температурная зависимость энергии Урбаха образцов 0.5at%Er: YAG и 3at%Tm: YAG показана на рисунке 2.

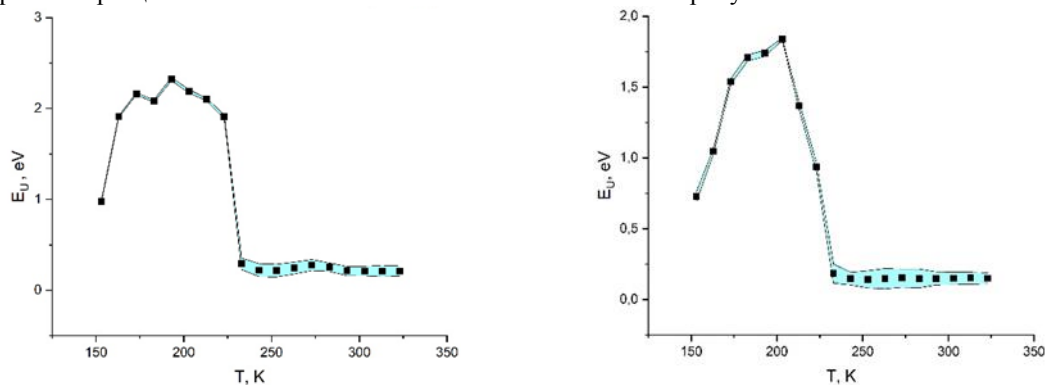


рис 2. Зависимость энергии Урбаха от температуры для образцов 0.5at%Er: YAG (слева) и 3at%Tm: YAG (справа).

Из полученных зависимостей следует, что в температурном диапазоне 150-230 К энергия Урбаха зависит от температуры, а следовательно, в данном материале имеется достаточно сильная энергия электрон-фононного взаимодействия, что может приводить к диссипации энергии, вызванной возбуждением колебаний решетки. В температурном диапазоне 230-320 К такой зависимости не наблюдается и поэтому энергией электрон-фононного взаимодействия можно пренебречь.

Список публикаций:

- [1] Qiang Liu et al. Solid-state reactive sintering of YAG transparent ceramics for optical applications // J. Alloy Compd.
- [2] Dhoble S. J. et al. (ed.). Spectroscopy of lanthanide doped oxide materials. – Woodhead Publishing, 2019.
- [3] Riungu G. G. et al. Optical band energy, Urbach energy and associated band tails of nano crystalline TiO2 films at different annealing rates // American Journal of Nanosciences. – 2021. – Т. 7. – №. 1. – С. 28-34.

## Алгоритм “unfolding-synthesis” в некорректных задачах обработки мёссбауэровских спектров

*Брущенко Альберт Игоревич*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

*Дулов Евгений Николаевич, к.ф.-м.н.*

*[greatvalorlight@mail.ru](mailto:greatvalorlight@mail.ru)*

Аморфные металлические сплавы — сравнительно новый класс материалов, которые обладают неупорядоченной структурой и, в связи с этим, уникальными свойствами. Такие материалы представляют класс локально неоднородных систем и интерпретация мёссбауэровских спектров, по восстановленной функции плотности вероятности сверхтонких параметров, представляет собой некорректную задачу, которую решают методами, часто основанными на регуляризации Тихонова [1].

Один из вариантов метода Тихонова реализован Хёссе и Рубарчом в применении к мёссбауэровской спектроскопии. На данный момент есть усовершенствованные методы на основе метода Хёссе-Рубарча [2].

В 2016 был предложен метод “unfolding-synthesis”. Он используется для преобразования формы импульсов с детекторов ионизирующего излучения [3]. Отличительной чертой метода является преобразование сигналов с детекторов в короткие импульсы, за которым следует свёртка с желаемой формой импульса. Этот метод неявно содержит способ решения некорректно поставленной задачи, по результату схожий с методом регуляризации Тихонова.

В данной работе показано, что метод “unfolding-synthesis” имеет ряд преимуществ и может быть использован для восстановления функции плотности вероятности сверхтонкого магнитного поля аналогично методу Тихонова.

Список публикаций:

[1] Тихонов А. Методы решения некорректных задач. М., 1979. 283 с.

[2] Hesse J. Model independent evaluation of overlapped Mossbauer spectra. J. Phys. E., 1974. P.526–532.

[3] Jordanov T. Unfolding-synthesis technique for digital pulse processing., 2016. P. 63–71.

## Симметрия потенциальных функций молекул $XY_3Z$ ( $C_{3v}$ ) и $XY_2Z_2$ ( $C_{2v}$ )

*Войлошников Алексей Данилович*

*Томский политехнический университет*

*Уленков Олег Николаевич, д.ф.-м.н.*

*[adv10@tpu.ru](mailto:adv10@tpu.ru)*

Проблема определения колебательной структуры многоатомных молекул является одной из наиболее актуальных проблем, поскольку такая информация является чрезвычайно востребованной для решения различных задач физики молекул и физической химии. Для разрешения отмеченной проблемы в физике молекул традиционно используются, как минимум, два типа колебательных координат. Это нормальные координаты, которые, как известно, являются массово-взвешенными, то есть различаются даже для различных изотопологов одной и той же молекулы (однако, они наиболее удобны при расчетах колебательных состояний молекулы). С другой стороны, традиционно используются так называемые «естественные» координаты (или же близко с ними связанные координаты симметрии), которые не зависят от масс атомов и являются универсальными для всех изотопологов молекулы. При этом, при решении реальных задач весьма важным является вопрос о корректной связи между всеми тремя типами координат.

В принципе координаты симметрии и естественные координаты легко могут быть определены для любой многоатомной молекулы. Однако, существует по меньшей мере один класс молекул, для которых определение координат симметрии и естественных координат является нетривиальной задачей. Это молекулы пространственной конфигурации  $XY_4$  ( $T_d$ ),  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ),  $XY_2Z_2$  ( $C_{2v}$ ) и молекулы подобного типа более низкой симметрии. Всех их объединяет так называемая проблема «redundancy», которая является следствием того факта, что число вводимых симметричных/естественных колебательных координат оказывается больше числа возможных независимых колебательных координат в молекуле. То есть естественные координаты/координаты симметрии оказываются зависимыми, а это в свою очередь проявляется в некорректности описания колебательной структуры молекул с использованием таких координат.

Данная проблема может быть решена путём установления связей между зависимыми координатами, и она была решена применительно к молекулам тетраэдрической симметрии  $XY_4$  в работе [2]. В данном

исследовании проблема «redundancy» рассматривается применительно к молекулам более низкой симметрии –  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ) и  $XY_2Z_2$  ( $C_{2v}$ ). Ключевым аспектом в установлении таких связей является использование так называемого условия «redundancy» [2]:

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha_{12} & \cos \alpha_{13} & \cos \alpha_{14} \\ \cos \alpha_{12} & 1 & \cos \alpha_{23} & \cos \alpha_{23} \\ \cos \alpha_{13} & \cos \alpha_{23} & 1 & \cos \alpha_{34} \\ \cos \alpha_{14} & \cos \alpha_{24} & \cos \alpha_{34} & 1 \end{bmatrix} = 0,$$

где  $\alpha_{ij}$  – это углы между межатомными связями  $i$  и  $j$ . Результатом преобразования левой части условия является набор условий (уравнений) для молекул  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ) и  $XY_2Z_2$  ( $C_{2v}$ ), зависящих от изменений угловых координат  $\theta_{ij} = \alpha_{ij} - \alpha_{ij}^e$  ( $\alpha_{ij}^e$  – значение угла между связями для равновесной конфигурации). Полученный набор разделен на степени величины  $\theta_{ij}$  и в полной мере раскрывает связи между угловыми колебательными координатами в молекуле. Однако сам по себе этот набор не так полезен, как колебательная структура с его использованием.

Потому следующей задачей в работе становится построение потенциальной функции для молекул  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ) и  $XY_2Z_2$  ( $C_{2v}$ ) в естественных колебательных координатах и координатах симметрии. Для этого был определен базис в обеих системах координат для молекул обоих типов симметрии. Далее на этом базисе разложена в ряд Тейлора часть гамильтониана молекулы, отвечающая за её потенциальную энергию – потенциальная функция. Для естественных колебательных координат группировка различных комбинаций проводилась на основании представлений о природе тех межатомных связей, с которыми они связаны. В случае координат симметрии в первую очередь был определён набор всевозможных полносимметричных комбинаций координат, поскольку лишь структуры симметрии  $A_1$  возможны в гамильтониане реальной молекулы. Далее на этом наборе уже сконструирована потенциальная функция. Потенциальная функция молекулы в двух системах координат, связь между этими системами и условие «redundancy» позволяют согласовать количество параметров в потенциальной функции для обеих систем координат, что в конечном итоге даёт набор выражений, которые определяют связь параметров «симметричной» потенциальной функции и «естественной». Этот набор позволяет свободно работать с колебательной структурой молекулы.

Результатами работы являются 2 набора выражений связывающих «симметризованные» и «естественные» параметры потенциальной функции молекул  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ) и  $XY_2Z_2$  ( $C_{2v}$ ), соответственно. Наборы представлены в группах по степеням координат и оформлены в виде таблиц, где каждая строка является равенством  $f_{abc}$  и линейной комбинации  $F_{efg}$ . Здесь  $f_{abc}$  – «естественные» параметры потенциальной функции молекулы, а  $F_{efg}$  – «симметризованные» параметры для системы симметризованных координат.

Для общего представления о характере полученных результатов далее приведена небольшая часть из набора полученных соотношений для молекулы  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ):

Таблица 1 – связь симметричных и силовых параметров  $V_{str-bend(R\alpha)}^{2(3)}$

Естественные силовые параметры	Симметричные силовые параметры
$F_{RR'\alpha}$	$F_{223} + 4 F_{344} - 4 F_{445} - 2 F_{245} - 2 \frac{A_1}{A_2} F_{246} - 4 \frac{A_1}{A_2} F_{446}$
$F_{RR'\alpha'}$	$2F_{223} - 4 F_{344} - 8 F_{445} + 2 F_{245} + 2 \frac{A_1}{A_2} F_{246} - 8 \frac{A_1}{A_2} F_{446}$

В данной работе мы решили проблему «redundancy» для молекул  $XY_3Z$  ( $C_{3v}$ ) и  $XY_2Z_2$  ( $C_{2v}$ ), получив тем самым набор соотношений, устанавливающий зависимости между избыточными естественными колебательными координатами. Определён базис в естественных колебательных и симметричных координатах, в этом базисе разложена в ряд Тейлора потенциальная функция для каждой молекулы, согласованы силовые параметры потенциальных функций обеих молекул вплоть до четвертых степеней колебательных координат.

Список публикаций:

[1] Макушкин Ю.С., Уленков О.Н., Чеглоков А.Е. // Симметрия и её применение к задачам колебательно-вращательной спектроскопии в 2ч.: монография. – Томск : ТГУ, 1990.

[2] Lauri Halonen // Internal coordinate Hamiltonian model for Fermi resonances and local modes in methane – Finland, University of Helsinki, 1996.

# Исследование абсолютных интенсивностей спектра поглощения сероводорода $\text{H}_2^{\text{M}}\text{S}$ ( $M = 32, 33, 34$ ) в районе первой декады

*Ганпель Екатерина Витальевна*  
Томский политехнический университет  
Бехтерева Елена Сергеевна, д.ф.-м.н.  
[Katya\\_gappel@mail.ru](mailto:Katya_gappel@mail.ru)

Молекула  $\text{H}_2\text{S}$  представляет большой интерес для спектроскопических исследований, поскольку сероводород является одной из важных компонент Земной атмосферы. Он был обнаружен также в атмосферах других планет Солнечной системы и в межзвездном пространстве. Сера является ключевым элементом в химии некоторых планет-гигантов, поскольку предполагается, что газообразные соединения серы вступают в реакцию с  $\text{NH}_3$  и конденсируются в виде кристаллов  $\text{NH}_4\text{SH}$ , которые образуют тропосферные облака этих планет [1-2]. Например, сероводород обнаружен в атмосферах Урана и Юпитера. Кроме того, молекула сероводорода, возможно, является индикатором биологической жизни [3-4].

Спектроскопические исследования молекулы  $\text{H}_2\text{S}$ , как и молекулы воды, проводятся активно уже много десятков лет. К настоящему времени, в литературе имеется много информации о поглощении сероводородом в микроволновом, инфракрасном и видимом диапазонах. Однако, имеется существенный недостаток в информации об абсолютных интенсивностях отдельных линий поглощения как в основной модификации сероводорода, так и в различных его изотопозамещенных разновидностях в высоковозбужденных колебательных состояниях.

Экспериментальные спектры поглощения молекулы были зарегистрированы в Техническом университете Брауншвейга в широком спектральном диапазоне  $3400\text{-}10400\text{ см}^{-1}$  с использованием Фурье-спектрометра Bruker 125HR (прототип ZP2001 IFS120 HR) при комнатной температуре  $294.15\text{ К}$ , оптической длине пути  $182\text{ м}$  и  $163\text{ м}$ , давлениях  $5\text{ мбар}$  и  $20\text{ мбар}$ . (см. рис. 1)

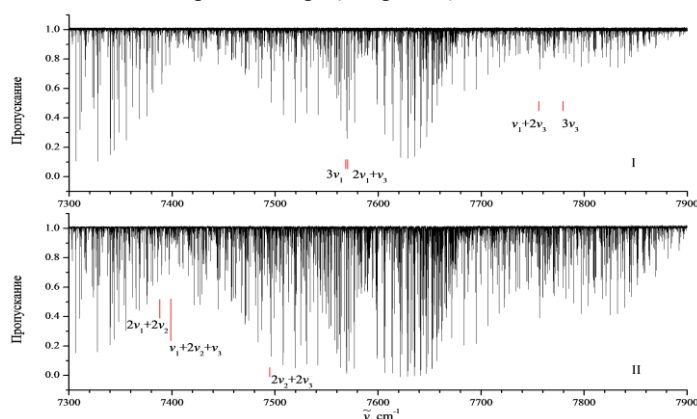


рис.1 Спектр молекулы  $\text{H}_2\text{S}$

Молекула  $\text{H}_2\text{S}$  является молекулой типа ассиметричного волчка группа молекулярной симметрии которой изоморфна группе  $\text{C}_{2v}$ . Три колебательные координаты  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$  обладают симметрией  $A_1$ ,  $A_1$ , и  $B_2$ , соответственно и соответствующие гармонические частоты имеют значения  $2614,44$ ,  $1182,53$  и  $2628,37\text{ см}^{-1}$  [5]. Соотношение частот  $\omega_1 = \omega_3 = 2\omega_2$  определяет структуру колебательного спектра, характеризуемую полиадным числом  $V = v_1 + v_2 / 2 + v_3$ . В данной работе исследовалась полиада  $V=3$ , включающая десять состояний.

Два типа колебательно-вращательных полос возможно наблюдать в спектрах поглощения сероводорода:

- параллельные полосы – это полосы с четным  $v_3$ ; правила отбора для них

$$\Delta J = 0, \pm 1; \Delta K_a = \pm(2n + 1); \Delta K_c = \pm(2m + 1)$$

- перпендикулярные полосы – это полосы с нечетным значением квантового числа  $v_3$

$$\Delta J = 0, \pm 1; \Delta K_a = \pm 2n; \Delta K_c = \pm(2m + 1)$$

Для анализа переходов был использован метод комбинационных разностей, для чего использовалось основное состояние молекулы из работы [6]. В результате этого были определены энергии колебательно-вращательных состояний шести возбужденных колебательных состояний (300), (201), (102), (003), (121) и (220) с максимальными значениями квантовых чисел  $J=20$  и  $K_a=5$ . Кроме этого для всех спектральных линий были определены абсолютные значения интенсивностей.



Всего проинтерпретировано и отнесено к исследуемым полосам 3787 переходов. Также, используя контур Артманна-Тран, были определены экспериментальные значения абсолютных интенсивностей этих 3787 переходов.

Список публикаций:

1. A. Castets, C. Ceccarelli, B. Lefloch, E. Caux and L. Pagani, *Sulphur-bearing species in the star forming region L1689N*//*AstronAstrophys*- 2004-V. 413-p.609–622.
2. Visscher C, Lodders K, Fegley JB, *Atmospheric Chemistry in Giant Planets, Brown Dwarfs, and Low-Mass Dwarf Stars II. Sulfur and Phosphorus* //*AstronAstrophys* 2006- V. 648-p.1181–95.
3. Aladro R, Martin S, Martin-Pintado J, Mauersberger R, Henkel C,  $\lambda=1.3\text{mm}$  and 2 mm molecular line survey towards M82 //*AstronAstrophys*- 2011-V.535-A84.
4. Justanont K, Khouri T, Maercker M, Alcolea J, Decin L, Olofsson H, *The Herschel Exploitation of Local Galaxy Andromeda (HELGA): IV. Dust scaling relations at sub-kpc resolution*//*AstronAstrophys* 2012-V.537-A144.
5. O. N. Ulenikov, I. E. S. Bekhtereva, I. C. Leroy, 2 and O. V. Gromova. *On the determination of the intramolecular potential functions for a polyatomic molecule: H<sub>2</sub>S*//*Russian Physics Journal*-Vol. 51- No. 1, 2008.
6. Flaud J-M, Camy-Peyret C, Johns JWC. *The far-infrared spectrum of hydrogen sulfide. The (000) rotational constants*//*CanJPhys* 1983- V.61-p. 1462–73.

## Определение фокусного расстояния сфокусированного пучка с дислокацией волнового фронта по дифракции на прямоугольном экране

Ивченко Илья Дмитриевич<sup>1,2</sup>

Бибикова Эвелина Анатольевна<sup>1,2</sup>, Кундикова Наталья Дмитриевна<sup>1,2</sup>, Мингажитдинов Эмиль Ильясович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электрофизики УрО РАН

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет

Бибикова Эвелина Анатольевна

[ivchenkoid@susu.ru](mailto:ivchenkoid@susu.ru)

Разработан способ определения положения перетяжки пучка с дислокацией волнового фронта по динамике дифракционной картины, получаемой с помощью непрозрачного прямоугольного экрана по аналогии со способами [1,2]. Для этого пучок с дислокацией волнового фронта перекрывался вертикально наполовину непрозрачным экраном и затем фокусировался линзой. Было проведено моделирование распространения при этих условиях пучка Гаусса, в который была введена дислокация волнового фронта, с помощью быстрого преобразования Фурье. На рис.1 представлено полученное в результате моделирования поперечное распределение интенсивности пучка с топологическим зарядом  $-6$  для различных расстояний от перетяжки в обе стороны. Анализ динамики дифракционной картины показывает, что происходит ее поворот в том же направлении, в котором закручивается волновой фронт пучка. Однако в положении перетяжки (позиция 0,00 мм) картина симметрична относительно границы экрана, и это является критерием для метода определения места нахождения перетяжки.

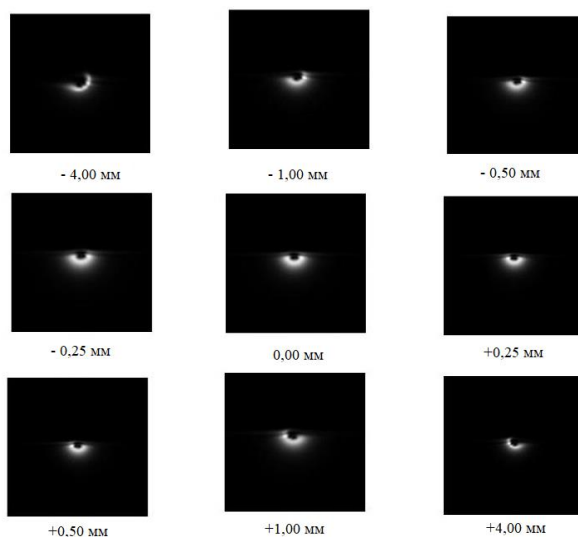


рис. 1. Поперечное распределение интенсивности сфокусированного пучка с дислокацией волнового фронта  $-6$ , усеченного наполовину экраном слева до линзы с фокусным расстоянием 40 мм, на различном расстоянии от положения перетяжки. Наблюдение в направлении распространения пучка.

Результаты моделирования подтверждаются экспериментально. На рис.2 соответствующие экспериментально полученное поперечное распределение интенсивности сфокусированного пучка с дислокацией волнового фронта  $-6$ , усеченного наполовину заслонкой *слева* до линзы с фокусным расстоянием 40 мм. Аналогично результатам моделирования дифракционная картина в положении перетяжки симметрична относительно края заслонки. При этом следует отметить, что пучок можно перекрывать лишь примерно наполовину (небольшие отклонения на характер дифракционной картины не влияют). Точность определения перетяжки при данном способе составляет 1%. Подобные результаты с той же точностью данный метод показывает для линзы с фокусным расстоянием 100 мм.

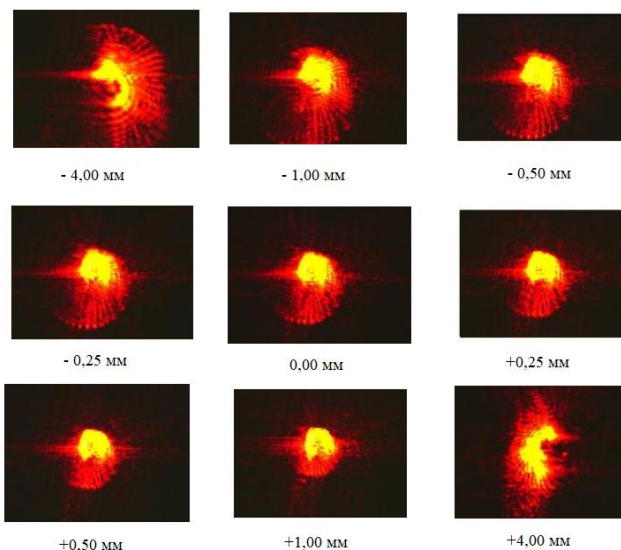


рис. 2. Поперечное распределение интенсивности сфокусированного пучка с дислокацией волнового фронта  $-6$ , усеченного наполовину заслонкой *слева* до линзы с фокусным расстоянием 40 мм, на различном расстоянии от положения перетяжки. Наблюдение в направлении распространения пучка.

Список публикаций:

- [1] Bibikova, E. A., Al-wassiti, N. & Kundikova, N. D. Diffraction of a Gaussian beam near the beam waist. // *J. Eur. Opt. Soc. Publ.* 15, 17–20 (2019).  
 [2] Bekshaev, A. & Mikhaylovskaya, L. Displacements of optical vortices in Laguerre–Gaussian beams diffracted by a soft-edge screen. // *Opt. Commun.* 447, 80–88 (2019).

## Случайные резонансы в многоатомных молекулах: $\text{H}_2\text{C}=\text{CD}_2$ , состояния $(\nu_2=1, A_1)/(\nu_7=2, A_1)/(\nu_8=2, A_1)$

*Кузьминов Данила Андреевич*

*Глушков Петр*

*Томский политехнический университет*

*Бехтерева Елена Сергеевна, д.ф.-м.н.*

*[dak97@tpu.ru](mailto:dak97@tpu.ru)*

Молекула этилена важна для многочисленных научных и прикладных задач физики, химии, астрофизики, метеорологии, атмосферной оптики. Этилен - это природное ненасыщенное органическое соединение, содержащееся в окружающем воздухе и влияющее на химический состав атмосферы и глобальный климат. В результате реакции с гидроксильным (ОН) радикалом этилен играет значительную роль в химии тропосферы и образовании озона. Этилен является одним из наиболее важных веществ, изучаемых в астрофизике. Он был обнаружен в атмосферах внешних планет Юпитера, Сатурна, Нептуна. Поэтому в течение многих лет молекула этилена и ее различные изотопологи были предметом обширных исследований.

Исследуемый спектр высокого разрешения молекулы  $\text{CH}_2=\text{CD}_2$  зарегистрирован в области  $1300\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ , где расположены полосы  $\nu_2$ ,  $2\nu_7$  и  $2\nu_8$ . С помощью инфракрасного Фурье-спектрометра Bruker IFS-125HR были сняты два спектра, при общих экспериментальных условиях: температуре 294 К и разрешении  $0.0025\text{ см}^{-1}$ . Различие заключается в длине оптического пути – 16 м и 24 м – и давлении – 0,3 мбар и 1,4 мбар, соответственно. Два спектра необходимы для проведения наиболее полного анализа серий переходов с

большими значениями квантовых чисел  $J, K_a$ , для которых линии становятся слабо интенсивными. На Рисунке 1 приведен обзорный спектр, зарегистрированный с меньшим давлением.

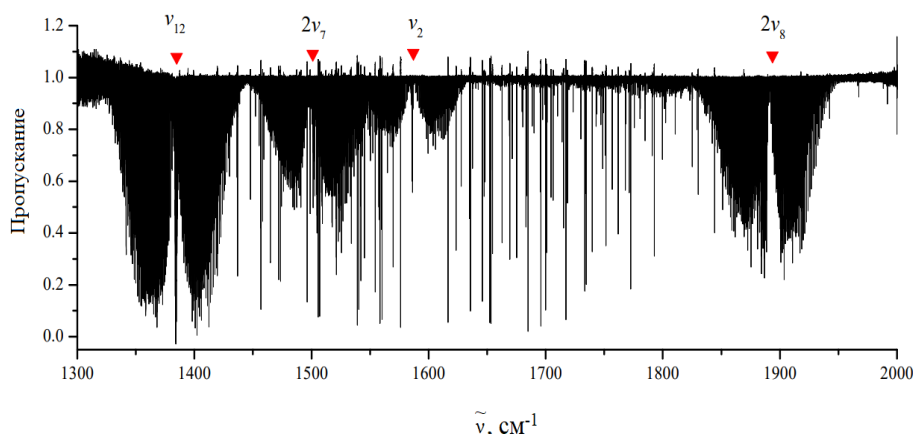


рис. 1. Обзорный спектр молекулы  $\text{CH}_2=\text{CD}_2$ , зарегистрированный с давлением 0,3 мбар и длиной пути 16 м при комнатной температуре.

Рассматриваемые полосы в заданном диапазоне  $\nu_2$  (растяжение  $\text{C}=\text{C}$ ) и  $2\nu_7$  (первый обертоном внеплоскостного колебания  $\text{CH}_2=\text{CD}_2$ ) являются полосами  $a$ -типа [2]. Правила отбора для таких полос

$$\Delta J = 0, \pm 1; \Delta K_a = 2n; \Delta K_c = 2n + 1;$$

В дальнейшем будет решена обратная спектроскопическая задача: определены вращательные, центробежные и резонансные параметры, которые входят в систему резонирующих состояний. Эффективный гамильтониан (1) изолированного состояния, в таком подходе, будет использоваться как оператор диагонального блока, [1]:

$$\begin{aligned} H_{vv} = E^v + \left[ A^v - \frac{1}{2}(B^v + C^v) \right] J_z^2 + \frac{1}{2}(B^v - C^v) J^2 + \frac{1}{2}(B^v + C^v) J_{xy}^2 - \\ \Delta_K^v J_z^4 - \Delta_{JK}^v J_z^2 J^2 - \Delta_J^v J^4 - \delta_K^v [J_z^2, J_{xy}^2] - 2\delta_J^v J^2 J_{xy}^2 + \\ H_{KJ}^v J_z^6 + H_{KJ}^v J_z^4 J^2 + H_{JK}^v J_z^2 J^4 + H_J^v J^6 + [J_{xy}^2, h_K^v J_z^4 + h_{JK}^v J^2 J_z^2 + h_J^v J^4] + \\ L_K^v J_z^8 + L_{KKJ}^v J_z^6 J^2 + L_{JK}^v J_z^4 J^4 + L_{JJK}^v J_z^2 J^6 + L_J^v J^6 + [J_{xy}^2, l_K^v J_z^6 + l_{KJ}^v J_z^4 J^2 + l_{JK}^v J_z^2 J^4 + l_J^v J^6] \\ + P_K^v J_z^{10} + [J_{xy}^2, p_K^v J_z^8] \quad \#(1) \end{aligned}$$

$A^v, B^v, C^v$  – эффективные вращательные параметры с колебательным состоянием  $v$ , а другие параметры представляют собой коэффициенты центробежных искажений разного порядка.

В данном диапазоне присутствуют полосы  $\nu_{12}(A_1)$ ,  $2\nu_{10}(A_1)$ ,  $\nu_7+\nu_{10}(A_2)$ ,  $\nu_4+\nu_{10}(B_2)$ ,  $\nu_4+\nu_7(B_1)$  соответствующие состояния которых резонируют по типам Ферми, Дарлинг-Деннисона и Кориолиса [1], которые образуют систему резонирующих состояний. В рассматриваемом диапазоне энергий расположено 16 таких полос, из которых  $\nu_2$ ,  $2\nu_7$  и  $2\nu_8$  являются одними из самых ярких и интенсивных. Энергии верхних состояний полос  $\nu_2$  и  $2\nu_7$  уже рассчитаны, производится расчёт энергий нового состояния, которое также важно, так как даст большой вклад в расчёт гамильтониана -  $2\nu_8$ , центр полосы для которой рассчитан на основе параметров из работы [2].

Метод эффективных операторов, используемый для теоретического анализа, включая описание резонансных взаимодействий построен для 8 состояний. Матрица эффективного оператора, при этом, имеет вид, приведенный на рис 2.

Анализ спектра молекулы  $\text{CH}_2=\text{CD}_2$  полос  $\nu_2$ ,  $2\nu_7$  и  $2\nu_8$  выполнен с использованием метода комбинационных разностей до максимального значения квантового числа  $K_a = 12$ , квантовое число в некоторых сериях достигает значений  $J^{\max} = 41$ . Параметры основного состояния и его структура были взяты из работы [1].

Проведен анализ колебательно-вращательных переходов в полосах  $\nu_2$ ,  $2\nu_7$  и  $2\nu_8$ . Всего найдено 4358 переходов. Количество экспериментально определенных колебательно-вращательных уровней составило 952.

		A <sub>1</sub>				A <sub>2</sub>		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
		2ν <sub>10</sub>	ν <sub>12</sub>	2ν <sub>7</sub>	ν <sub>2</sub>	ν <sub>7</sub> +ν <sub>10</sub>	ν <sub>8</sub> +ν <sub>10</sub>	ν <sub>4</sub> +ν <sub>7</sub>	ν <sub>4</sub> +ν <sub>10</sub>
A <sub>1</sub>	2ν <sub>10</sub>	W	DD		F	ξ <sub>7,10</sub> <sup>z</sup>	ξ <sub>8,10</sub> <sup>z</sup>	ξ <sub>4,10</sub> <sup>y</sup>	ξ <sub>4,10</sub> <sup>x</sup>
	ν <sub>12</sub>	W							
	2ν <sub>7</sub>		W	F					
	ν <sub>2</sub>			W					
A <sub>2</sub>	ν <sub>7</sub> +ν <sub>10</sub>					W		ξ <sub>4,10</sub> <sup>x</sup>	ξ <sub>4,7</sub> <sup>y</sup>
	ν <sub>8</sub> +ν <sub>10</sub>						W		ξ <sub>4,8</sub> <sup>y</sup>
B <sub>1</sub>	ν <sub>4</sub> +ν <sub>7</sub>							W	ξ <sub>10,7</sub> <sup>z</sup>
B <sub>2</sub>	ν <sub>4</sub> +ν <sub>10</sub>								W

рис. 2. Матрица эффективного оператора

Список публикаций:

- [1] Ulenikov ON, GromovaOV, BekhterevaES, BerezkinKB, Sklyarova EA, Maul C, et al. Study of the High Resolution FTIR Spectrum of CH<sub>2</sub>=CD<sub>2</sub> in the Region of 1300-1450 cm<sup>-1</sup>: the ν<sub>12</sub> (A<sub>1</sub>) and 2ν<sub>10</sub> (A<sub>1</sub>) Bands. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2015; 161:180–96;
- [2] Martin, Jan ML, et al. "The anharmonic force field of ethylene, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, by means of accurate ab initio calculations." The Journal of chemical physics 103.7 (1995): 2589-2602.

## Программные пакеты для расчёта и анализа XAFS-спектров

**Макаров Павел Андреевич**

Некипелов Сергей Вячеславович, Сивков Виктор Николаевич

Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр» УрО РАН

[makarova@ipm.komisc.ru](mailto:makarova@ipm.komisc.ru)

В настоящее время спектроскопические исследования в рентгеновской области чаще всего проводятся на синхротронах [1]. Результаты этой работы широко используются для анализа всех классов материалов [2]. В рентгеновском спектральном диапазоне свет в основном поглощается веществом в ходе фотоэлектрического эффекта, однако могут происходить и другие явления (в частности, образование электрон-позитронных пар). Все последствия фотопоглощения в применении к молекулам, жидкостям и твёрдым телам приводят к тем или иным методам XAFS - X-ray Absorption Fine Structure spectroscopy [3].

Как известно [1-3], уравнение XAFS может быть записано в виде

$$\chi(k) = \sum_j \frac{N_j f_j(k) e^{-2k^2 \sigma_j^2 - 2R_j/\lambda(k)}}{k R_j^2} \sin [2k R_j + \delta_j(k)]$$

Это уравнение с математической точки зрения отражает несколько важнейших физических идей, лежащих в основе XAFS.

Из-за членов  $\lambda(k)$  и  $R_j$  XAFS является локальным методом зондирования, не способным “видеть дальше примерно 5 Å от поглощающего атома”.

1. Колебания XAFS определяются набором различных частот, соответствующих различным расстояниям для каждой координационной оболочки. Это приводит к необходимости использования в анализе преобразования Фурье.
2. Для извлечения из результатов эксперимента данных о расстояниях и координационных числах необходимо знать точный вид функций амплитуды рассеяния  $f(k)$  и фазового сдвига  $\delta(k)$ .

Последний пункт - необходимость точного определения амплитуды рассеяния и фазового сдвига рассеяния - является одним из важнейших вопросов в области XAFS. Хотя первые попытки вычислить эти функции были успешными на качественном уровне, они, как правило, не были достаточно точными для использования в анализе. В самых первых XAFS-анализах функции  $f(k)$  и  $\delta(k)$  могли быть определены только из экспериментальных спектров, для которых были известны точные расстояния между ближними соседями и их типами (как правило, из измерений кристаллов с очень хорошо известной структурой). Такие экспериментальные стандарты могут быть достаточно точными, но, как правило, ограничиваются оболочкой первых соседей. Вплоть до начала 1990-х годов использование таких стандартов было достаточно распространённым. За последние десятилетия расчеты  $f(k)$  и  $\delta(k)$  стали более точными и доступными, и использование экспериментальных стандартов в XAFS-анализе стало редкостью. Расчётные функции рассеяния (вычисленные, например, с помощью программ FEFX, GNXAS и EXCURVE) не лишены проблем, но, как неоднократно было показано, достаточно точны для использования в реальном анализе, а в некоторых случаях даже точнее, чем экспериментально полученные коэффициенты рассеяния. Кроме того, рассчитанные коэффициенты не ограничиваются первой оболочкой и могут учитывать многократное рассеяние фотоэлектрона.

В данной работе обсуждается практика применения актуальных современных языков программирования, систем компьютерной математики, программных библиотек и пакетов, а также специализированных профессиональных баз данных и средств создания высококачественного контента, применимых в XAFS-спектроскопии.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351

Список публикаций:

- [1] Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 672 С.  
 [2] van Bokhoven J.A., Lamberti C. X-ray absorption and X-ray emission spectroscopy: theory and applications. Wiley, 2016. 900 P.  
 [3] Newville M. Fundamentals of XAFS. 2008, 41 P.

## **Связанные состояния в континууме в цепочке из керамических дисков со структурным беспорядком**

**Назаров Равшанжон Холикбердиевич**

*Ханабиев Денис Маратович, Маслова Екатерина Эдуардовна*

*Кондратенко Зарина Фаильевна*

*Университет ИТМО*

*Кондратенко Зарина Фаильевна*

*[z.sadrieva@metalab.ifmo.ru](mailto:z.sadrieva@metalab.ifmo.ru)*

Связанные состояния в континууме (ССК) — это локализованные состояния, энергия которых находится в непрерывном спектре [1]. ССК могут возникать как в открытой системе (резонаторе), за счет деструктивной интерференции утекающих мод с близкими или даже одинаковыми собственными частотами, так и одномерных или двумерных периодических фотонных структурах [1]. Например, в работах [2,3] авторы сообщают о реализации ССК в одномерной периодической структуре с аксиальной симметрией.

Механизм возникновения ССК в осесимметричных структурах можно объяснить следующим образом. Благодаря аксиальной симметрии вдоль оси периодичности электрическое поле  $\mathbf{E}$  может быть записана в виде

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}(r, z) e^{\pm i k_z z \pm i m \varphi} \quad (1)$$

где  $z$  — направление периодичности,  $\varphi$  — азимутальная переменная, от которой зависимость поля задается как функция синуса или косинуса в силу наличия оси вращения диска  $z$ , и  $m$  — проекция орбитального углового момента. Знаки перед  $z$  описывают вырождение мод вдоль направления распространения, в то время как знаки перед азимутальным номером показывает вырождение мод относительно вращения вокруг оси периодичности. В силу периодичности структуры амплитуду  $\mathbf{A}(r, z)$  можно разложить в ряд Фурье, где коэффициенты разложения описывают количество утекающей энергии из системы. При

открытии нулевого дифракционного канала коэффициент разложения будет равняться среднему значению поля по элементарной ячейке. При нечетности распределения поля относительно отражения в вертикальной плоскости, среднее значение поля по периоду будет равняться нулю, что говорит об отсутствии поля в дальней зоне. Это достигается лишь у мод с  $m=0$ , и соответствует ССК [2]. Такие ССК называют защищенными симметрией, и являются устойчивыми по отношению к возмущениям, которые не нарушают симметрию структуры [1]. В силу ряда ограничений реальных физических систем, таких как конечность размера системы, присутствие материальных потерь и появлении структурных нарушений при изготовлении, связанные состояния превращаются в квази-ССК с конечной времени жизни. Следовательно, исследование влияния вышеуказанных факторов на устойчивость квази-ССК является актуальной задачей.

В данной работе мы изучили влияния беспорядка на добротность квази-ССК моды с нулевым орбитальным угловым моментом. На первом этапе была реализована модель в пакете COMSOL Multiphysics для расчета собственных мод периодической структуры. В результате была получена зонная диаграмма и распределение моды, которые приведены на рис. 1.

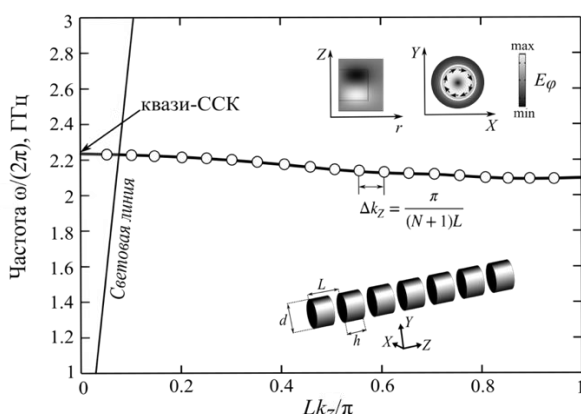


рис.1. Зонная диаграмма и геометрия рассматриваемой структуры с периодом  $L = 34$  мм, радиусом дисков  $R = 15$  мм и их высотой  $h = 20$  мм. Точки в дисперсионной кривой отображают квантования зоны при, где  $N$  количество дисков. В ставках показано распределение поля в двух разных проекциях. Диэлектрическая проницаемость диска и тангенс угла потерь равны  $44$  и  $10^{-4}$  соответственно

Далее мы исследовали влияния структурного беспорядка на добротность квази-ССК. Структурный беспорядок был задан с помощью выражения:

$$z_i = \frac{3L-h}{2} + L((i-1) + \sigma \cdot rand), \quad (2)$$

где  $\sigma$  — параметр беспорядка, который меняется от 0 до 0.2;  $i$  — порядковый номер диска;  $rand$  — случайное число от -1 до 1. Случайные значения с равномерным распределением были сгенерированы с помощью встроенной функции программного пакета MATLAB.

В результате мы получили, что для структуры с большой диэлектрической проницаемостью квази-ССК является более стабильным по отношению к беспорядку, чем для структур, имеющие малый оптический контраст [4]. В частности, среднее значение добротности квази-ССК уменьшается как  $\sigma^{-1}$  с увеличением параметра беспорядка, что отличается от квадратичного закона, приведенного в работе [4]. Полученные нами результаты имеют важное значение для экспериментальной реализации ССК в естественных фотонных структурах, где структурное нарушение играет решающую роль.

Список публикаций:

- [1] Кошелев К. Л., Садриева З. Ф., Щербаков А. А., Кившарь Ю. С., Богданов А. А // УФН. 2023. Т. 193. № 5. С. 528–553.
- [2] Bulgakov E. N., Sadreev A. F. //Physical Review A. 2017. Vol. 96. № 1. p. 013841.
- [3] Sadrieva Z. F. et al. //Physical Review A. 2019. Vol. 99. № 5. p. 053804.
- [4] Maslova E. E. et al. //Nanophotonics. 2021. Vol. 10. № 17. p. 4313-4321.

## Синхротронное излучение: ультрамягкая спектроскопия поглощения биологических объектов и композитов на их основе

*Петрова Ольга Викторовна*

*Бакина Ксения Андреевна, Скандаков Роман Николаевич, Некипелов Сергей Вячеславович*

*Сивков Виктор Николаевич*

*Федеральный исследовательский центр Коми научный центр УрО РАН*

*[teiou@mail.ru](mailto:teiou@mail.ru)*

Синхротронное излучение (СИ) – это электромагнитное излучение ультрарелятивистских электронов, ускоряемых в циклических ускорителях [1]. Особый интерес к изучению ускоряемых заряженных частиц появился в сороковых годах нашего века из-за предельной энергии электронов, достижимой в бетатронах. В 1944 году Д. Иваненко и И. Померанчук опубликовали статью, в которой показали, что потери на магнитотормозное излучение в бетатроне пропорциональны четвертой степени энергии ускоренных электронов. Такое явление было названо "светящийся электрон". Однако первые попытки экспериментального обнаружения синхротронного излучения не привели к успеху, поскольку его поиски велись в СВЧ-диапазоне. В 1947 году на синхротроне американской компании "Дженерал Электрик" Ф. Хабер аспирант профессора Х. Поллака при проведении профилактических работ случайно обнаружили яркий голубоватый свет с орбиты электрона, поэтому это излучение получило название синхротронного излучения. Позднее теоретически было показано, что максимум СИ смещен в область высоких частот, по отношению к частоте вращения электрона по орбите,  $\omega_0=c/(2\pi R)$ , где  $c$  – скорость света,  $R$  – радиус орбиты электрона, и даже для ускорителей, работающих на 80 МэВ, уже смещается в область вакуумного ультрафиолета, а для современных синхротронов с большей энергией электрона – в рентгеновскую область. В 1948 году А. Соколов и Д. Иваненко опубликовали работу, представляющую формулу для расчета спектральных и угловых характеристик синхротронного излучения. Развитие теории СИ в дальнейшем было дополнено исследованиями его поляризационных свойств проведенными сотрудниками физического факультета МГУ на синхротроне ФИАН. В 1960-х годах началось использование СИ в эксперименте, сначала в атомной спектроскопии, а затем и в физике твердого тела. С 1967 года СИ начали применять в спектроскопии твердого тела и для исследования высокоэнергетического возбуждения люминесценции. Первоначально для исследований использовалось излучение циклических ускорителей электронов (синхротроны первого поколения), затем были созданы специализированные источники СИ (синхротроны 2-го поколения). В настоящее время использование виглеров и ондуляторов позволило на порядки увеличить интенсивность СИ (синхротроны 3-го поколения) и стимулировало создание лазера на свободных электронах (синхротроны 4-го поколения).

СИ обладает рядом уникальных свойств определяющих его большое практическое значение для изучения структуры и строения материи: непрерывный спектр излучения от инфракрасного до рентгеновского; малая угловая расходимость испускаемого излучения; линейная поляризация СИ в плоскости орбиты; круговая поляризация выше и ниже плоскости орбиты; возможность точного расчета всех параметров излучения, высокая яркость источника во всем спектральном диапазоне.

В настоящее время благодаря появлению мощных источников СИ и спектральной аппаратуры высокого разрешения широкое применение для исследования неорганических и органических материалов на наноуровне получил метод ультрамягкой рентгеновской (УМР) абсорбционной спектроскопии (Near edge X-ray absorption fine structure, NEXAFS) [2], которая характеризуется атомной селективностью, дипольными правилами отбора, высокой чувствительностью к атомному составу и параметрам ближайшего окружения поглотившего рентгеновский квант атома. Структура спектров NEXAFS содержит уникальную информацию об атомном и химическом составе вещества, длине и углах атомных связей, а также энергии, составе и симметрии свободных электронных состояний. Источником такой информации являются спектральные зависимости сечения поглощения в области NEXAFS. В УМР области спектра 40-1500 эВ располагаются края поглощения внутренних 1s уровней атомов Li, C, N, O, F, Na, Mg, Al и 2p уровней атомов Si, P, Cl, K, Ca и 3d – переходных металлов, которые являются основой белковых структур и графитизированных биоматериалов (N, C и O), а также входят в состав обширного перечня нанокompозитных материалов.

В работе обсуждаются принципы генерации СИ и применение методов NEXAFS-спектроскопии с использованием СИ для исследования химического состава и нанокристаллической структуры костной ткани рыб и млекопитающих [3]; а также процесса графитизации биоматериалов в инертной атмосфере аргона [4-5].

Список публикаций:

[1] Тернов И.М. // УФН, 1995, Т 165(4), стр.429

[2] Stöhr J. // NEXAFS Spectroscopy: Springer, Berlin, 1992.

[3] Petrova O.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 917(4). P. 042001.

[4] Petrenko, I. et al // Science Advances. 2019. V. 5(10). P. eaax2805(12).

[5] Petrova, O. V. et al // Appl. Sci. 2023. V. 13(1). P. 128(13)

# Определение оптических констант фуллеренов в области аномальной дисперсии методом Крамерса Кронига

## Рутковский Валерий Олегович

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина  
Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр» УрО РАН

В.Н.Сивков, д.ф.-м.н.  
[valeriy.rutkovskiy@mail.ru](mailto:valeriy.rutkovskiy@mail.ru)

Определение спектральных зависимостей оптических констант (коэффициентов поглощения, преломления и отражения, атомного форм-фактора) для широкого спектра материалов и химических соединений является актуальной задачей современного материаловедения. Особенно эти данные востребованы для области резонансного фотопоглощения, где спектральные зависимости оптических характеристик немонотонно и представляют собой совокупность максимумов и минимумов. Современные теоретические модели не позволяют проводить расчеты этих зависимостей, поэтому для их определения востребованы экспериментальные методы их определения. Однако в рентгеновской области спектра прямые измерения коэффициентов отражения и преломления очень неточны из-за скользящих углов отражения, поэтому эти данные определяются косвенными методами. Один из таких методов основан на использование соотношений Крамерса Кронига (ККР) [1,2]. Интегральные соотношения ККР связывают коэффициенты поглощения и преломления (мнимую и вещественную части комплексного коэффициента преломления) и позволяют рассчитать спектральные зависимости коэффициента преломления через измеренные в широком спектральном интервале коэффициенты поглощения или сечения поглощения. Соотношения ККР также связывают действительную и мнимую части комплексных значений диэлектрической постоянной, коэффициентов отражения и преломления и атомный форм-фактор, поэтому из данных по сечениям поглощения можно определить все оптические постоянные в области резонансного поведения. Основной задачей настоящей работы является построение по литературным источникам и данным экспериментальных измерений спектральной зависимости сечений поглощения фуллерита C<sub>60</sub> в интервале энергий от 0 до 100000эВ, интерполяция этих зависимостей набором функций и проведение модельных расчетов спектральной зависимости коэффициента преломления фуллерита C<sub>60</sub> в области ближней тонкой структуры C1s – края поглощения атома углерода и в широком спектральном интервале.

Спектральные зависимости сечения поглощения в диапазоне энергий края поглощения C1s (280–320 эВ) были измерены в режиме полного выхода электронов (TEY) с использованием тонкого Ti-пленочного фильтра на российско-немецком канале выхода и монохроматизации синхротронного излучения на синхротронном источнике BESSY II (Гельмгольца-Zentrum Берлин, Германия) и на канале НаноФЭС Курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ) (г. Москва, Россия). Данные о сечениях поглощения в диапазоне энергий 10–30000 эВ были взяты из таблиц Хенке [3] и в длинноволновой области спектра из работ [4–8].

Компоненты комплексного коэффициента преломления для фуллерена C<sub>60</sub> были получены и визуализированы с помощью языка программирования Python с использованием библиотек Scipy для расчетов и Matplotlib для вывода графиков. Расчет действительной части комплексного коэффициента преломления был осуществлен с использованием соотношений ККР. На графике (рис 1.) представлены полученные зависимости компонент коэффициента преломления от энергии, рассчитанные для всего диапазона.

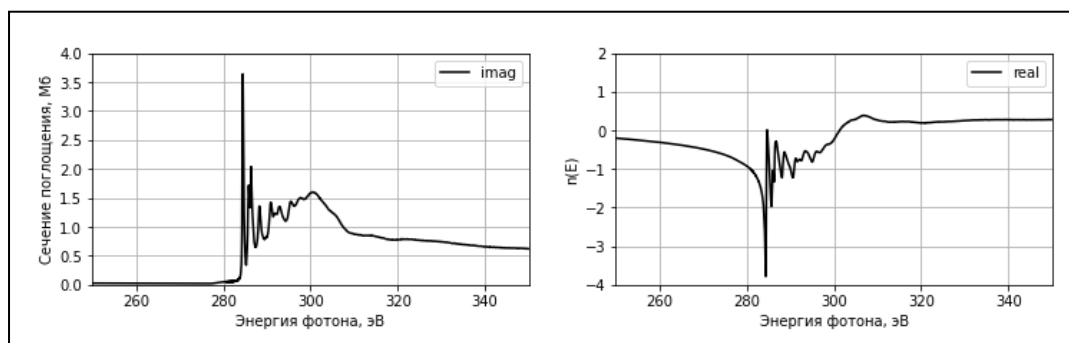


рис.1. Спектр фуллерена C<sub>60</sub> и полученная на его основе зависимость действительной части коэффициента поглощения от энергии в ближней области края поглощения

Список публикаций:

- [1] R. d. L. Kronig, J. Opt. Soc. Am. 1926. V.12(6). pp. 547 – 557.;
- [2] H. A. Kramers, Atti. Congr. Intern. Fisici. Como. 1927. V.2. p. 545.;
- [3] B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis, At. Data Nucl. Data Tables. 1993. V.54. pp. 181 – 343.;
- [4] B.L. Henke, J.P. Knauer, K. Premaratne // J. Appl. Phys.,1981. V.52 . P.1509-1520.;



- [5] A.J. Maxwell, P.A. Bruhwiler, D. Arvanitis, J. Hasselstrom, N. Martensson // *Chem. Phys. Lett.*, 1990, V.71, p.260.;
- [6] Г.В.Фетисов. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ (под редакцией Л.А.Асланова) Издательство М.: Физматлит -2007- 672 с. - ISBN 978-5-9221-0805-8.
- [7] Yasumatsu, Hisato; Kondow, Tamotsu; Kitagawa, Hiroshi; Tabayashi, Kiyohiko; Shobatake, Kosuke (1996). Absorption spectrum of C60 in the gas phase: Autoionization via core-excited Rydberg states. *The Journal of Chemical Physics*, 104(3), 899–. doi:10.1063/1.470813

## Новая модель эффективного дипольного момента молекул типа аксиальной симметрии $C_{3v}$ : приложения к исследованию абсолютных интенсивностей в полосе $\nu_6$ молекулы $CH_3^{35}Cl$

Сидько Сергей Сергеевич

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Уленков Олег Николаевич, д.ф.-м.н.

[sss60@tpu.ru](mailto:sss60@tpu.ru)

В последние годы возрос интерес к изучению метилхлорида как одного из хлорорганических соединений, оказывающих негативное влияние на процессы промышленной транспортировки и переработки нефтепродуктов [1]. Также проводятся теоретические исследования, включающие анализ поверхностей потенциальной энергии, вычисление уровней колебательной энергии и другие аспекты колебательно-вращательной теории для молекул аксиальной симметрии, в том числе  $CH_3Cl$  [2].

Изучение спектров дает возможность получить обширную информацию о веществах, содержащихся в газовой смеси, в которой был проведен анализ спектра. Положение линий спектра позволяет определить состав газовой смеси, а интенсивность линий – концентрацию веществ, парциальное давление, температуру и другие параметры. В общем случае, интенсивность колебательно-вращательных линий, обусловленная переходами из состояния  $|i\rangle$  в состояние  $|f\rangle$ , определяется выражением [3]:

$$S_{\nu_0} = \frac{8\pi^3\nu_0}{4\pi\epsilon_0 3hc} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{k_B T}\right) \right] N \frac{g_i}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \mathcal{R}_i^f, \quad (1)$$

где  $\nu_0 = (E_f - E_i)/hc$  – волновое число перехода;  $E_f$  и  $E_i$  – верхняя и нижняя энергии колебательно-вращательного перехода;  $g_i$  – статистический вес обусловленный ядерным спином;  $N$  – количество поглощающих молекул на единицу объема;  $Z(T)$  – статистическая сумма;  $T$  – температура;  $\mathcal{R}_i^f$  – квадрат матричного элемента оператора дипольного момента. Использование этой формулы для расчета выше перечисленных параметров газа невозможно без знания матричных элементов оператора дипольного момента.

Модель эффективного дипольного момента для молекул с осевой симметрией  $C_{3v}$  получена на основе свойств симметрии молекулы. Эта модель учитывает поправки четвертого порядка к основному параметру дипольного момента. Полученный оператор оказался намного более простым и понятным для использования в приложениях по сравнению с существующими моделями.

Благодаря усовершенствованной модели и значительно лучшими экспериментальными данными по сравнению с теми, что были выполнены ранее, нам удалось проинтерпретировать в полосе  $\nu_6$  молекулы  $CH_3^{35}Cl$  более 5100 переходов с максимальными значениями квантовых чисел  $J = 68$  и  $k = 21$ , что более чем в 1,5 раза больше по сравнению с тем, чем было до того известно в мировой литературе. Выполненный методом наименьших квадратов анализ позволил воспроизвести весь объем экспериментальных данных со среднеквадратичным отклонением  $4,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ , что в 2 раза лучше, чем было известно до сих пор.

Абсолютные интенсивности более 2080 переходов были получены из соответствия их форм профилю Армана-Тран, а параметры эффективного дипольного момента полосы  $\nu_6$  молекулы  $CH_3^{35}Cl$  были определены с помощью компьютерной программы, созданной на основе теоретической модели. Средняя воспроизводимость экспериментальных данных составила порядка 3,4 %, что в несколько раз лучше, чем было ранее известно в литературе.

Список публикаций:

- [1] Gutzeit, *Effect of organic chloride contamination of crude oil on refinery corrosion*, NACE–International corrosion conference series, Corrosion 2000 (2000) 135866. ISSN 03614409
- [2] A.S. Grossman, K.E. Grant, W.E. Blass, D.J. Wuebbles, *Radiative forcing calculations for CH3Cl and CH3Br*, *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 13651–13656.
- [3] Flaud, J.; Camy-Peyret, C. *Vibration–rotation intensities in H2O–type molecules application to the 2ν2, ν1, ν3 band of H2 16O*. *J. Mol. Spectrosc.* 1975, 55, 278–310. [https://doi.org/10.1016/0022-2852\(75\)90270-2](https://doi.org/10.1016/0022-2852(75)90270-2).

## Комплексные исследования нанопористого кремния, полученного путём травления с добавлением 5 % раствора йода

**Скандаков Роман Николаевич**

*Бакина Ксения Андреевна<sup>1</sup>, Петрова Ольга Викторовна<sup>1,2</sup>, Макаров Павел Андреевич<sup>1</sup>, Некипелов Сергей Вячеславович<sup>1</sup>, Сивков Виктор Николаевич<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Физико-математический институт Федерального исследовательского центра «Коми научный центр» Уральского отделения Российской академии наук*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет*

*Сивков Виктор Николаевич*

[scanick@yandex.ru](mailto:scanick@yandex.ru)

В работе исследованы образцы нанопористого кремния, приготовленные методом электрохимического травления. Что бы узнать детали структуры нанопористого кремния был проведён комплексный анализ результатов ультрамягкой рентгеновской спектроскопии (NEXAFS и XPS), растровой электронной микроскопии (РЭМ), методом полного внешнего отражения (ПВО), двухкристалльных кривых дифракционного отражения (КДО).

Для приготовления образцов использовался метод электрохимического травления (ЭХТ) в режиме анодирования в одинаковых условиях в виде слоев пористого кремния  $n^+$ -типа проводимости на подложках Si(111)(Sb) (удельное сопротивление подложек  $\rho \approx 0.01$  Ом·см) и  $p^+$ -типа проводимости на подложках Si(111)(В) ( $\rho \approx 0.005$  Ом·см). Анодирование осуществлялось в течение  $t = 1$  мин при постоянном токе  $J = 50$  мА/см<sup>2</sup> во фторопластовой двухкамерной ячейке с платиновыми электродами. Травление поверхности подложки кремния происходило через диафрагму диаметром 10 мм. Электролитом служил раствор на основе этанола и плавиковой кислоты:  $C_2H_5OH : HF(49\%) = 1 : 1$ , как с добавлением 5 % раствора йода, так и без него [1].

Полученные методами ультрамягкой рентгеновской спектроскопии (NEXAFS и XPS) результаты в сопоставлении с данными электронной микроскопии, а также ПВО и КДО, позволяют сделать следующие выводы: 1) добавление йода в раствор значительно влияет на структурные параметры нанопористого кремния, 2) добавление йода в электролит способствует получению слоев ПК с пористостью 60 % и более для подложек как  $p^+$ -, так и  $n^+$ -типа проводимости, 3) Анодирование в стандартном электролите формируют на подложках  $p^+$ -типа слои с более высокой пористостью 4) пористость имеет величину около 50 %. Поры диаметром 315 нм и длиной  $l \approx 30$  нм ветвятся вдоль направлений (111), При этом линейные размеры структурных элементов нанопористого кремния ограничены соседними порами, а их значения варьируются в широких пределах 5-50 нм. 5) Анализ интерфейса между кремниевым скелетом и оксидом ( $Si^{4+}$ ) показал, что в нем присутствуют монослои оксидов кремния с промежуточными зарядовыми состояниями  $Si^+(0.1$  нм),  $Si^{2+}$  (0.05 нм),  $Si^{3+}$  (0.25 нм).

Оценка величины пористости (таблица 1) слоев Р проводилась согласно подходу [4].

Список публикаций:

[1] Brown F.C. *Extreme ultraviolet transmission of crystalline and amorphous silicon* / F.C. Brown, O.P. Rustgi // *Phys. Rev. Lett.* 1972. No. 28. P. 497.

[2] *X-ray fluorescence measurements of x-ray absorption near edge structure at the Si, P, and S L edges* / M. Kasrai, Z. Yin, G. Bancroft, K.H. Tan. // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1993. No. 11. P. 2694.

## Спектральная зависимость фототока в МДП-структурах на основе нестехиометрических германосиликатных плёнок

**Хамуд Гайсаа Аббас**

*Камаев Геннадий Николаевич, Vergnat Michel, Володин Владимир Алексеевич*

*Новосибирский государственный университет*

*Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.*

[k.gaisaa@g.nsu.ru](mailto:k.gaisaa@g.nsu.ru)

Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структуры) привлекают внимание для использования в фотовольтаике, причем в последнее время не только в качестве приборов с зарядовой связью. Например, предпринимаются попытки внедрить в диэлектрик светопоглощающие квантовые точки, чтобы улучшить чувствительность фотодиодов на основе барьера Шоттки [1]. Толстые слои  $SiO_x$  также используются в качестве хорошо поглощающего свет диэлектрического слоя, поскольку их оптические и транспортные

свойства можно модифицировать путём увеличения содержания избыточного кремния [2]. Для повышения фоточувствительности МДП-структуры с диодом Шоттки диэлектрик с одной стороны должен ограничивать темновой ток, с другой стороны не препятствовать прохождению фототока. Возможно, что германосиликатные плёнки ( $\text{GeSi}_x\text{O}_y$ ) будут превосходить плёнки  $\text{SiO}_x$  по этим качествам. Целью данной работы являлось исследование спектральной зависимости фототока в МДП-структурах на основе  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$ , в том числе в структурах с включением нанослоя аморфного германия в слой диэлектрика.

Плёнки и многослойные структуры  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$  были осаждены на подложку n-Si(001) с удельным сопротивлением  $\rho=5,5\pm 1$  Ом·см методом высоковакуумного электронно-лучевого осаждения. Были осаждены следующие структуры: S1 - n-Si/SiO<sub>2</sub>(2нм)/GeSi<sub>0,9</sub>O<sub>2,8</sub>(30нм) и S2 - n-Si/SiO<sub>2</sub>(5нм)/Ge(3нм)/GeSi<sub>0,9</sub>O<sub>2,8</sub>(25нм) (в качестве образца-спутника со слоем Ge). Верхние прозрачные контакты ITO (indium-tin-oxide) были нанесены методом магнетронного распыления с размером 0,7x0,7 мм. Образцы отжигались в течение 30 мин при температуре 500 °С в воздушной атмосфере. Вольтамперные характеристики (ВАХ) структур до и после отжига исследовались в темноте и при освещении галогенной лампой. Для измерений спектральной зависимости фототока в диапазоне 250-1150 нм использовался источник света на основе галогенной лампы с монохроматором разработки ООО НПК «Центр нанотехнологий» (Новосибирск). Целью отжига была модификация структурных свойств плёнок  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$ , так как отжиг приводил к образованию нанокластеров аморфного германия, которые являются центрами формирования проводящих филаментов в плёнках [3].

При освещении образца светом галогенной лампы в нулевом порядке монохроматора (весь спектр излучения) на образец попадало около 500 микроватт световой мощности. Темновые ВАХ и с такой подсветкой показаны на рис. 1 для исходного образца S1. Видно, что при обратном смещении фототок превышает темновой ток на три порядка (рис. 1). Также видно, что при освещении на диоде возникала фото-ЭДС.

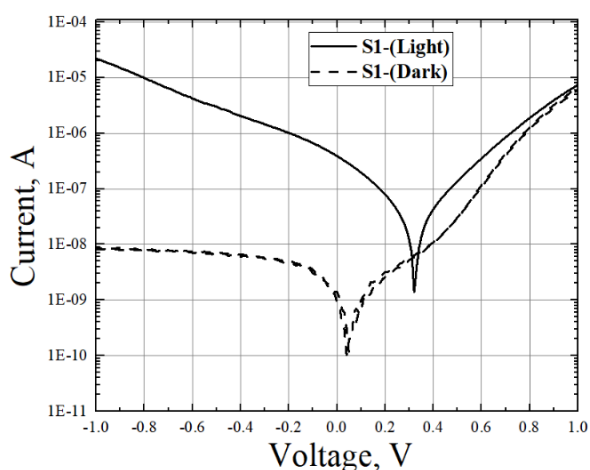


рис.1. ВАХ образца S1 в темноте и при освещении.

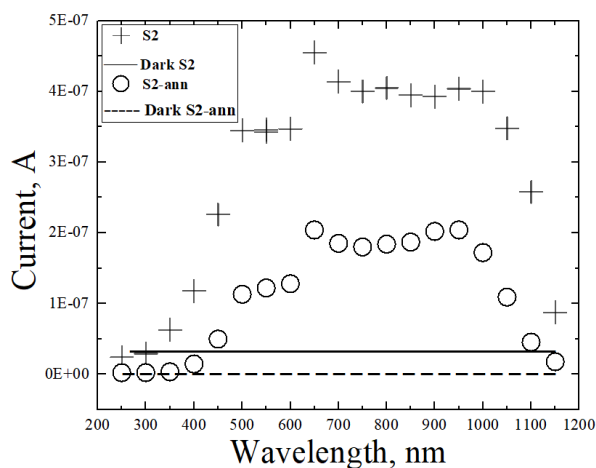


рис.2. Спектральная зависимость фототока образца S2 при -1В до и после отжига в спектральном диапазоне 250-1150 нм.

На рис. 2 показана спектральная зависимость фототока для образца S2 (исходного и отожжённого) и темновой ток (сплошной и штрихованной линиями для исходного и отожжённого соответственно) при напряжении -1 В. Видно, что в результате отжига темновой ток в образце S2, содержащем слой германия, значительно уменьшился. В образце S1 без слоя германия темновой ток после отжига наоборот немного увеличился (результаты не показаны здесь). На рисунке 2 видно, что фототок возникал начиная с 350 нм, а затем достигал максимального значения при 650 нм, что отражало спектральную мощность источника света. Снижение фототока в области длинных волн связано с уменьшением поглощения света в области пространственного заряда (обеднения) в подложке кремния. Хотя основная часть светового потока и поглощается в этой области, обсуждаются также эффекты поглощения света как в слое ITO, так и в слое диэлектрика, особенно в случае образца S2, содержащего нанометровый слой германия. Также видно, что после отжига фоточувствительность снижается во всей области спектра, но при этом темновой ток снижается ещё сильнее, так что фоточувствительность сохраняется.

Если оценить ампер-ваттные характеристики наших образцов, то можно сделать вывод, что фоточувствительность МДП-структур с диодом Шоттки на основе  $\text{GeSi}_x\text{O}_y$  значительно превышает фоточувствительность, которая была получена при добавлении квантовых точек германия в слой диоксида кремния [1]. Вполне возможно, что наш подход можно использовать для создания недорогих фотодиодов, не содержащих p-n переходов.

Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки РФ, проект FSUS-2024-0020.

Список публикаций:

[1] Aouassa M. et al. *Highly Improved Mis Photodetector Sensitivity Using Ge Nanocrystals*. – 2021. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-217720/v1>

[2] Mendoza Conde G. O. et al. *MIS-like structures with silicon-rich oxide films obtained by HFCVD: Their response as photodetectors* // *Sensors*. – 2022. – Т. 22. – №. 10. – С. 3904.

[3] Volodin V. A., Kamaev G. N., Vergnat M. *Negative and positive photoconductivity and memristor effect in alloyed GeO [SiO] films containing Ge nanoclusters* // *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*. – 2020. – Т. 14. – №. 7. – С. 2000165.

## Исследование субмиллиметрового спектра высокого разрешения молекулы $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$

Худякова Юлия Вадимовна

Томский политехнический университет

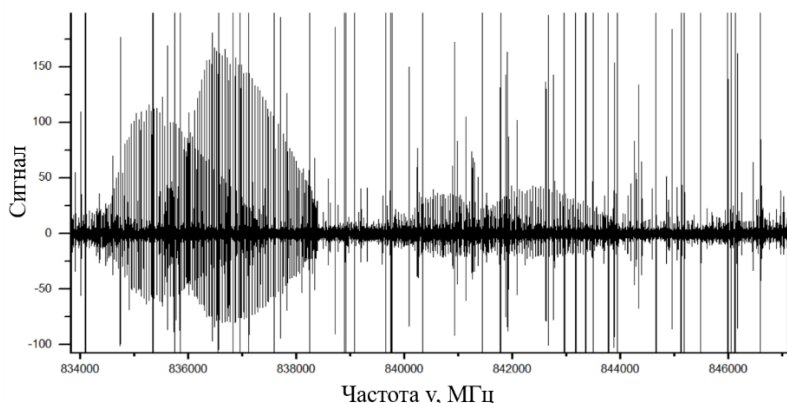
Громова Ольга Васильевна, д.ф.-м.н.

[yvh7@tpu.ru](mailto:yvh7@tpu.ru)

Метиленхлорид (дихлорметан)  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  относится к хлорорганическим соединениям, это летучее, токсичное вещество. Дихлорметан широко применяется в промышленности в качестве растворителя, его попадание в окружающую среду с газоздушными выбросами – один из факторов, приводящих к образованию озоновых дыр [1]. Актуальной задачей в настоящее время является оперативный контроль содержания дихлорметана в нефти, нефтепродуктах, т.к. наличие в них хлорорганических соединений приводит к коррозии оборудования, его износу и, как следствие, – к значительным расходам на ремонт, к авариям [2]. Разработки в этой области представляют большой практический интерес для нефтегазодобывающей и нефтегазоперерабатывающей промышленности. Спектроскопические исследования закладывают фундаментальные основы таких методик и приборов контроля.

Выбор для анализа молекулы  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  обусловлен ее недостаточной изученностью по сравнению с другими соединениями из класса хлороалканов. Ранее изучались спектры дихлорметана в среднем и дальнем инфракрасном (ИК), микроволновом диапазоне [3–5]. Интерпретация вращательных переходов в терагерцовой области для молекулы метиленхлорида до настоящего момента не проводилась. Использование для анализа спектров субмиллиметрового (терагерцового) диапазона позволяет получить результаты с существенно большей точностью, чем ИК-исследования. Положения линий в таком эксперименте могут быть определены с погрешностью 0,02 МГц, или  $7 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ , в то время как для ИК-области характерны значения порядка  $10^{-4} \text{ см}^{-1}$  [6]. В настоящей работе впервые проанализированы данные такой высокой точности для состояния  $\nu_4 = 1$  молекулы  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ .

Экспериментальные спектры были зарегистрированы в Кёльнском университете (Германия) и Университете Лилль (Франция) в диапазоне 0,075 – 1,090 ТГц. Измерения проводились при комнатной температуре, при давлениях 1,5-10 Па, с использованием генератора сигнала R&S@SMF100A в качестве источника излучения и, в зависимости от спектральной области, диода Шоттки либо охлаждаемого жидким гелием InSb (QMC Instruments Ltd) в качестве приемника. Фрагмент одного из спектров приведен на *рис. 1*.



*рис.1. Фрагмент спектра полосы  $\nu_4$  молекулы  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$*

Дихлорметан  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  относится к молекулам типа асимметричного волчка с группой симметрии, изоморфной точечной группе  $C_{2v}$ . Исследовалась вращательная структура колебательной полосы  $\nu_4 = 1$  (полносимметричное ножничное колебание Cl-C-Cl, первое возбужденное состояние) изотополога  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$ . Для искомым переходов в Q-ветви выполнялись правила отбора  $\Delta J = 0, \Delta K_a = \pm 1$ . Интерпретация проводилась

вплоть до значений  $J_{\max} = 101$  и  $K_{a \max} = 19$ , т.к. только линии, отвечающие переходам на данные  $K_a$ , присутствовали в зарегистрированном диапазоне.

Для решения обратной спектроскопической задачи требуется провести расчет параметров эффективного гамильтониана Уотсона, имеющего следующий вид [7]:

$$H^v = E^v + \left[ A^v - \frac{1}{2}(B^v + C^v) \right] J_z^2 + \frac{1}{2}(B^v - C^v) J^2 + \frac{1}{2}(B^v + C^v) J_{xy}^2 - \Delta_K^v J_z^4 - \Delta_{JK}^v J_z^2 J^2 - \Delta_J^v J^4 - \delta_K^v [J_z^2, J_{xy}^2] - 2\delta_J^v J^2 J_{xy}^2 + H_K^v J_z^6 + H_{KJ}^v J_z^4 J^2 + H_{JK}^v J_z^2 J^4 + H_J^v J^6 + [J_{xy}^2, h_K^v J_z^4 + h_{JK}^v J_z^2 J^2 + h_J^v J^4] + L_K^v J_z^8 + L_{KKJ}^v J_z^6 J^2 + L_{JK}^v J_z^4 J^4 + L_{JJK}^v J_z^2 J^6 + L_J^v J^6 + [J_{xy}^2, l_K^v J_z^6 + l_{KJ}^v J_z^4 J^2 + l_{JK}^v J_z^2 J^4 + l_J^v J^6] + P_K^v J_z^{10} + [J_{xy}^2, p_K^v J_z^8], \quad (1)$$

где  $A^v, B^v, C^v$  - вращательные постоянные, связанные с колебательными состояниями  $v$ ; остальные параметры являются параметрами центробежного искажения различных порядков.

Исследуемый спектр дихлорметана также позволяет наблюдать сверхтонкую структуру спектральных линий, обусловленную эффектом квадрупольного расщепления. Данный эффект характерен для молекул, в состав которых входят ядра со значением спина больше, чем 1/2 (для Cl ядерный спин равен 3/2) [8, 9]. В настоящей работе определялись положения только центров мультиплетов, сверхтонкая структура будет проанализирована в дальнейшем.

В результате анализа проведена интерпретация вращательного спектра высокого разрешения молекулы  $\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2$  в диапазоне 0,075 – 1,090 ТГц, определены положения 1466 вращательных переходов, отнесенных к полосе  $\nu_4$ . Полученные данные необходимы для решения обратной спектроскопической задачи на основе модели эффективных операторов.

Список публикаций:

- [1] Sun, X. Removal of gaseous volatile organic compounds via vacuum ultraviolet photodegradation: Review and prospect // *Journal of Environmental Sciences*. 2023. Vol. 125. – P. 427-442.
- [2] Mitra, S. Organic Chlorides in Petroleum Crude Oil: Challenges for Refinery and Mitigations // *ChemBioEng Reviews*. 2022. Vol. 9. № 3. – P. 319-332.
- [3] Duncan, J. L. Methylene chloride: The mid-infrared spectrum of an almost vibrationally unperturbed molecule / J.L. Duncan, G.D. Nivellini, F. Tullini – Text : direct // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 1986. Vol. 118. Methylene chloride. № 1. – P. 145-162.
- [4] Myers, R. J. The Microwave Spectra, Structure, Dipole Moment, and Chlorine Nuclear Quadrupole Coupling Constants of Methylene Chloride / R.J. Myers, W.D. Gwinn – Text : direct // *The Journal of Chemical Physics*. 2004. Vol. 120. № 9. – P. 1420-1427.
- [5] Tullini, F. The far-infrared spectrum of methylene chloride // *Journal of Molecular Spectroscopy*. 1989. Vol. 138. № 2. – P. 355-374.
- [6] Ulenikov, O. High-resolution spectroscopy of  $\text{C}_2\text{H}_3\text{D}$ : Line positions and energy structure of the strongly interacting  $\nu_{10}, \nu_7, \nu_8, \nu_4$  and  $\nu_6$  bands // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022. Vol. 279. – P. 121401
- [7] Watson, J. K. G. Determination of Centrifugal Distortion Coefficients of Asymmetric-Top Molecules / J.K.G. Watson – Text : direct // *The Journal of Chemical Physics*. 1967. Vol. 46. № 5. – P. 1935-1949.
- [8] Kisiel, Z. Nuclear quadrupole coupling in  $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CHCl}$  and  $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CH}_2$ : Evidence for systematic differences in orientations between internuclear and field gradient axes for terminal quadrupolar nuclei / Z. Kisiel, E. Bialkowska-Jaworska, L. Pyszczkowski – Text : direct // *The Journal of Chemical Physics*. 1998. Vol. 109. № 23. – P. 10263-10272.
- [9] Mallick, P. K. Rotational Spectra / P.K. Mallick // *Fundamentals of Molecular Spectroscopy* / ed. P.K. Mallick. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 13-53.

## Фототок в PIN структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния с включениями нанослоёв германия

Чэн Юйчжу

Камаев Геннадий Николаевич, Попов Александр Афанасьевич, Володин Владимир Алексеевич  
Новосибирский государственный университет

Володин Владимир Алексеевич, д.ф.-м.н.  
[chengyuzhu9@gmail.com](mailto:chengyuzhu9@gmail.com)

В настоящее время одним из эффективных способов реализации недорогих солнечных элементов и фотодетекторов на основе a-Si:H является использование PIN и NIP-структур с нановключениями из узкозонных полупроводников в нелегированный слой (I-слой). Например, в работе [1] была приготовлена периодическая многослойная структура nc-Ge:H (20 nm)/nc-Si:H (10 nm), содержащая нанокристаллы Ge размером около 5 нм. Благодаря экситонному поглощению света в нанокристаллах Ge, в NIP солнечном элементе на основе nc-Ge:H значительно усилился фотоотклик в диапазоне длин волн 1200–1450 нм. Недавно коллеги из Чехии создали PIN-диоды на основе a-Si:H с наночастицами германия и олова в I-слое и повысили

эффективность солнечных элементов [2]. Целью данной работы является исследование вольтамперных характеристик (ВАХ) PIN структур на основе аморфного гидрогенизированного кремния с включениями нанослоёв германия в темноте и при освещении видимым и инфракрасным (ИК) светом.

Образцы были получены методом плазмохимического осаждения (ПХО - PECVD). В качестве прекурсоров использовались газы  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{GeH}_4$  и  $\text{H}_2$ , температура подложки составляла  $220^\circ\text{C}$ . Были выращены PIN структуры на основе аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) на подложках из стекла, покрытого прозрачным электродом (ITO). Всего было изготовлено три типа образцов – первый образец без включения германия, второй с включением трёх слоёв германия (рис. 1) и третий с включением толстого слоя германия (32 нм). Для изучения структурных свойств образцов использовалась спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Использовался спектрометр КРС T64000 (Horiba Jobin Yvon) с микро-рамановской установкой и твердотельным волоконным лазером (514,5 нм) в качестве источника возбуждения. Из спектра КРС образцов 2 и 3 было определено, что они содержат слои аморфного кремния и аморфного германия, кристаллических включений не наблюдалось. Из анализа спектров КРС также было определено, что содержание водорода составляло примерно 18-20 атомарных %. Для исследования ВАХ на образцы были нанесены верхние электроды из алюминия (рис. 1). ВАХ структур исследовались как в темноте, так и при освещении красным светодиодом, и при инфракрасным светодиодом (длина волны 940 нм) со стороны контакта ITO.

На рис.2 сравниваются темновой ток и фототок образцов, не содержащих (образец 1 - квадратики) и содержащих германий (образец 2 - треугольники). Во всех случаях ток регистрировался при обратном смещении 2 Вольта. Сначала измерялся темновой ток, потом инфракрасный светодиод включался на 25 секунд, затем цикл повторялся. Видно, что в обоих образцах фототок превышал темновой ток почти на порядок. Темновой ток в образце 2 с включениями германия почти на порядок больше чем в образце без германия (образец 1). Однако, фототок при освещении ИК-светом образца 2 с включениями германия почти на порядок больше чем в образце 1 без германия. Для образца 3 фототок при освещении ИК-светом также был больше чем для образца 1 (без германия).

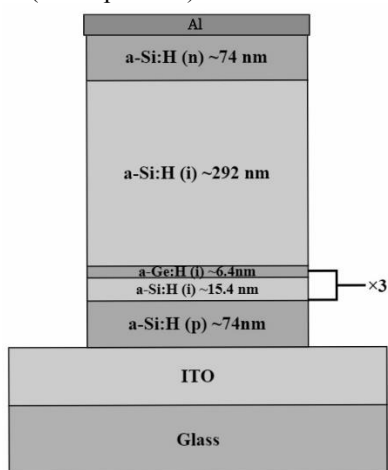


рис.1. Структура образца 2 - многослойная структура a-Ge/a-Si на подложке из стекла

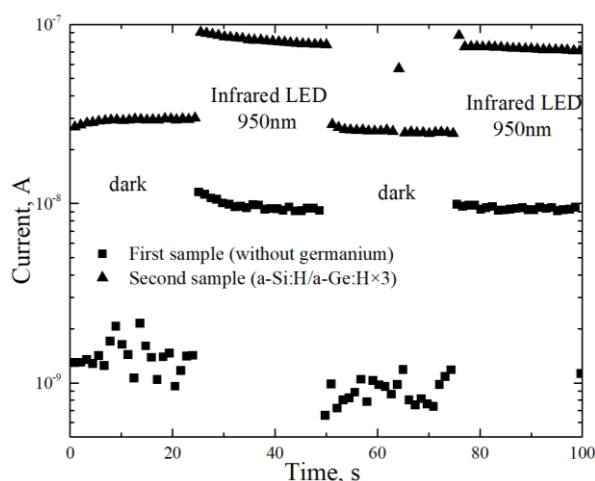


рис.2. Фототок (при освещении инфракрасным светодиодом (940 нм) со стороны ITO) и темновой ток в образцах 1 и 2

Стоит отметить, что во всех образцах при освещении возникала фото-ЭДС.

Итак, исследование фототока в PIN-структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния показало, что при освещении красным светом (поглощается в аморфном кремнии) фотоотклик больше для PIN-структуры, не содержащей слои германия. Однако, при освещении инфракрасным светом (940 нм – почти не поглощается в слоях аморфного кремния, но поглощается в слоях аморфного германия) фототок (при обратном смещении) больше для PIN-структур, содержащих слои германия. Таким образом, введение германия может расширить диапазон чувствительности фотодиодов в длинноволновую область. Возможно, что введение не сплошного слоя германия, а квантовых точек германия позволит увеличить чувствительность фотодиодов.

Работа выполнена при поддержке Министерства Образования и Науки РФ, проект FSUS-2024-0020.

Список публикаций:

- [1] Li C, Ni J, Sun X et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. № 50(4) P. 045108.  
 [2] The Ha Stuchlikova, Zdenek REMES, Jiri STUCHLIK // *Nanocon*. 2018. P. 226-229.

# Исследование структуры основанной на переходе металл-диэлектрик

в диоксиде ванадия

Яковлев Лев Алексеевич

Южный федеральный университет

Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.

e-mail: liakovlev@sfnu.ru

Гибридные метаматериалы, которые демонстрируют реконфигурируемые реакции при воздействии внешних раздражителей, таких как электрические поля и световое излучение, были продемонстрированы только недавно путем сочетания активных сред с узорчатыми металлическими структурами. Тем не менее, гибридные терагерцовые (ТГц) метаматериалы, спектральные характеристики которых можно динамически настраивать в больших масштабах, остаются редкостью. По сравнению с большинством активных сред (например, кремнием), которые обладают ограниченной активностью, диоксид ванадия (VO<sub>2</sub>), который проявляет переход диэлектрик-металл, недавно был исследован для создания динамически настраиваемых метаматериалов. Что еще более важно, фазовый переход приводит к увеличению ТГц электропроводности на три порядка, что говорит о потенциале создания гибридных резонаторов на основе VO<sub>2</sub>, работающих на ТГц частотах.

Диоксид ванадия обладает свойством фазового перехода из полупроводника в металл при температуре 67 градусов цельсия, это происходит из-за изменения структуры кристаллической решетки. Именно из-за этого свойства его применимость в электронике достаточно велика. В связи с тем, что свойство перехода диоксида ванадия из полупроводящего состояния в проводящее было объяснено только в 2018 году, данное направление исследований является достаточно новым и потенциально применимым в связи с тем, что обработка диоксида ванадия возможна на очень точном уровне, что позволит сделать электронные устройства ещё более компактными и энергоэффективными.

В данной работе исследуется возможность использования диоксида ванадия в дифракционных решётках (ДР) для управления ЭМ лучом. Были рассмотрены горячее и холодное состояние диоксида ванадия и исследованы отражающие и пропускающие свойства такой ДР в диапазоне частот от 0,1 до 3 ТГц.

В качестве метода исследования было использовано численно-аналитическое решение объемных интегральных уравнений для задач дифракции электромагнитных волн на диэлектрических телах. Для анализа полученных данных и построения графиков была использована программа Origin.

На полученных графиках можно отчетливо увидеть, что структура в холодном состоянии проявляет малоотражающие свойства, при этом с увеличением угла падения ЭМ луча коэффициент отражения увеличивается. Пик коэффициента пропускания приходится на частоту около 2,5 ТГц.

В горячем состоянии на малых частотах структура является проводящей, с увеличением частоты дифракционная решётка становится отражающей с коэффициентом отражения достигающим приблизительно 0,8.

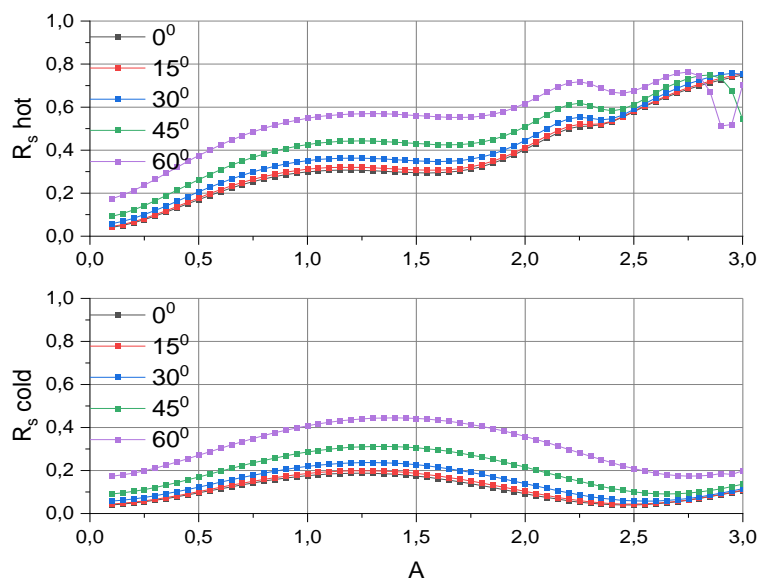


рис. 1 Зависимость коэффициента отражения от частоты



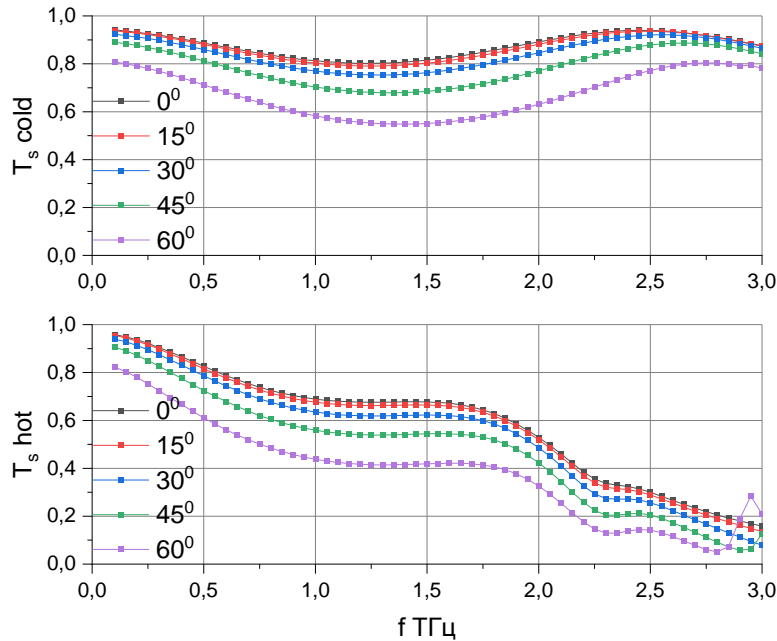


рис. 2 зависимость коэффициента пропускания от частоты

Таким образом, в проанализированной структуре можно получать отражающие или пропускающие свойства для определённого спектра частот, однако если изменить линейную структуру ДР можно получить подобный эффект для другого частотного спектра что позволяет индивидуальным образом настраивать полосу пропускания и отражения для определённых задач. Также необходимо отметить, что в связи с тем, что угол падения не может быть идеально равен запланированному значению, то могут возникать дополнительные потери при отражении или пропускании сигнала.

Список публикаций:

- [1] Shao, Z. W., Cao, X., Luo, H. & Jin, J. P. Recent progress in the phase-transition mechanism and modulation of vanadium dioxide materials. *NPG Asia Mater.* 10, 581–605 (2018).  
 [2] Yang, J. J., Strukov, D. B. & Stewart, D. R. Memristive devices for computing. *Nat. Nanotechnol.* 8, 13–24 (2013).

## Зависимость дозы введения апконверсионных наночастиц с изменениями оптических параметров опухоли

**Янина Ирина Юрьевна**

*Дарья Кирилловна Тучина, Екатерина Николаевна Лазарева, Роман Андреевич Анисимов, Мария Владимировна Ломова, Анна Алексеевна Доронкина, Артем Михайлович Мыльников, Никита Александрович Наволокин, Вячеслав Иванович Кочубей*

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет*

*имени Н.Г. Чернышевского*

*Янина Ирина Юрьевна*

*[irina-yanina@yandex.ru](mailto:irina-yanina@yandex.ru)*

В настоящее время традиционные методы лечения онкологических больных, несмотря на достижения в хирургии, использование совершенной техники для лучевой терапии, а также наличия множества средств и способов лекарственной терапии, не могут полностью удовлетворить требования клинической практики, поскольку близки к пределу своих возможностей. Каждому методу свойственны свои достоинства, недостатки и ограничения. Все это заставляет специалистов всего мира искать другие пути в диагностике и лечении онкологических больных. Одним из таких новых методов, показавшим свою перспективность в последние годы является фотодинамическая терапия.

Одним из перспективных материалов для развития методов фотодинамической терапии являются функционализированные апконверсионные наночастицы (АКНЧ), которые позволяют не только повысить эффективность терапии, но и расширить диагностический инструментарий. Сшивка фотодинамического красителя с оболочкой наночастиц требует дополнительного покрытия их поверхности. Покрытия частиц



сывороточным альбумином (СА) биосовместимы со многими типами клеток в широком диапазоне концентраций [1], легко усваиваются клетками [1, 2], неиммуногенны и имеют длительный период полураспада в кровотоке [3, 4]. Одним из этапов клинических исследований новых препаратов является, в частности, определение наиболее эффективной дозы, кратности введения [5].

Существуют некоторые проблемы при использовании фотосенсибилизатора (ФС), такие, как неспецифичное распределение их в организме и гидрофобность некоторых препаратов. Также к поверхности наночастиц могут быть присоединены нацеливающие агенты, позволяющие избирательно направлять их к определенным клеткам. В качестве нацеливающего агента может использоваться фолиевая кислота (ФК) [6-8]. В результате создается лекарственный препарат, специфичный для раковых тканей. Наряду с различием проницаемости кровеносных сосудов нормальных тканей и опухолей, создающим возможность пассивного накопления наночастиц в опухоли, создание функционализированных наночастиц позволяет повысить эффективность терапии [9].

Интерес представляет разработка методики получения наноконтейнеров, содержащих как фотосенсибилизатор, так и, например, АКНЧ [10, 11]. Применение АКНЧ позволит расширить область применения фотосенсибилизатора, за счет увеличения глубины проникновения света в биологические ткани.

Целью данного исследования было проведение сравнительного исследования влияния введения АКНЧ+ЧСА, и АКНЧ+ЧСА+ФК, на оптические параметры биологических тканей в области развития опухоли в зависимости от кратности введения

Измерения спектров полного и коллимированного пропускания, а также диффузного отражения биологических тканей крысы в области привития опухоли проводилось в спектральном диапазоне 380-2000 нм на спектрофотометре Lambda Perkin (Япония). Для обработки результатов экспериментов и определения оптических параметров использовался инверсный метод Монте-Карло [12, 13].

На рис. 1 представлено СЭМ-изображения синтезированных нами АКНЧ  $\text{NaYF}_4: \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ .

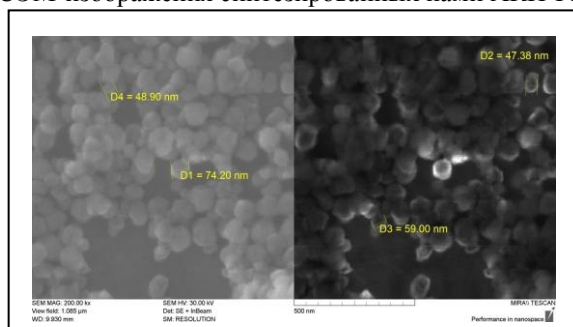


рис.1. СЭМ-изображения частиц  $\text{NaYF}_4: \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$

Данные об оптических свойствах тканей дают информацию о структурных изменениях, происходящих с биотканями и их компонентами, что необходимо учитывать при выборе терапии, дозе облучения, кратности введения препарата.

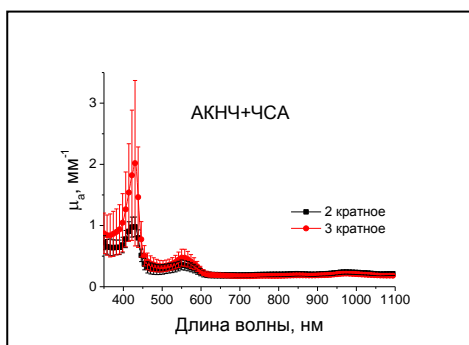


рис.2. Спектры поглощения опухолевой ткани для группы животных, которым вводились АКНЧ+ЧСА при 2х и 3х кратном внутривенном введении.

В спектрах поглощения опухолевой ткани наблюдается рост полос поглощения дезоксигемоглобина на 423 и 553 нм при увеличении кратности введения АКНЧ+ЧСА.

В данном исследовании показано изменение оптических параметров, таких как коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния, коэффициент анизотропии, биологических тканей до и после введения АКНЧ, взятых из зоны развития опухоли в зависимости от кратности введения. При введении АКНЧ+ЧСА

частиц наблюдался рост кровенаполнения тканей опухоли, в отличие от АКНЧ+ЧСА+ФК частиц, с ростом кратности введения. С ростом поглощения в полосах воды рассеяние уменьшается. Также с учетом токсического эффекта на органы и развития обратимых изменений в органах от введения частиц, наиболее целесообразным можно считать двукратное введение.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10057, <https://rscf.ru/project/21-72-10057/>

Список публикаций:

- [1] Michaelis K., Hoffmann M. M., et al. // *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 2006. V.31.P.1246.
- [2] Irache J. M., Merodio M., et al. // *Mini Rev. Med. Chem.* 2005. V.5. P. 293.
- [3] Loureiro A., Azoia N. G., et al. // *Curr. Pharm. Des.* 2016. V. 22. 1371.
- [4] An F. F., Zhang X. H. // *Theranostics.* 2017. V. 7.P. 3667.
- [5] *Качественная клиническая практика с основами доказательной медицины. Учебное пособие для системы послевузовского и дополнительного профессионального образования врачей / Под общей редакцией академика РАМН, профессора Р.Г.Оганова.* – М.: СилуцияПолиграф, 2011. – 136 с.
- [6] Zhang F. / *Springer.* 2016. 428 p.
- [7] Stella V., Arpicco S., et al. // *J. Pharm. Sci.* 2000. V. 89.No 11. P. 1452.
- [8] Сагайдачная Е. А., Янина И. Ю., Кочубей В. И. // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика.* 2018. Т. 18. вып. 4. С. 253.
- [9] Obaid G., Russell D. A. / in *Handbook of Photomedicine*, ed. M. R. Hamblin and Y.-Y. Huang, Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, FL. 2013. P. 367.
- [10] Wang C., Cheng L., Liu Z. // *Theranostics.* 2013. V. 3. P. 317.
- [11] Lee S. Y., Lee R., et al., *Front Bioeng Biotechnol.* 8, 275 (2020).
- [12] Башкатов А.Н., Генина Э.А., Кочубей В.И., Рубцов В.С., Колесникова Е.А., Тучин В.В. // *Кв. Элек.* 2014. Т. 44. № 8. С. 779.
- [13] Башкатов А.Н., Генина Э.А., Козинцева М.Д., Кочубей В.И., Городков С.Ю., Тучин В.В. // *Опт. спектр.* 2016. Т. 120. № 1. С. 6.



## 8 - Квантовая электроника и лазерная физика

Козлова Катерина Семеновна, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Исследование магнитооптических резонансов Белла-Блума в поле Земли в ячейке с парами  $87\text{Rb}$  для применения в магнитометрии**

Макаров Антон Олегович

e-mail: [k.kozlova1@g.nsu.ru](mailto:k.kozlova1@g.nsu.ru)

стр. 168

Прилуцкая Анна Александровна, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Стабилизация частоты полупроводникового лазера для экспериментов с одиночными атомами в оптических дипольных ловушках**

Бетеров Илья Игоревич, к.ф.-м.н.

e-mail: [a.prilutskaya@g.nsu.ru](mailto:a.prilutskaya@g.nsu.ru)

стр. 169

Щербак Вячеслав Валерьевич, 2 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Разработка модели люминесценции квантовых точек  $\text{CsPbBr}_3$  в приближении одиночного возбуждения**

Французов Павел Анатольевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [shdaver@gmail.com](mailto:shdaver@gmail.com)

стр. 170

# Исследование магнитооптических резонансов Белла-Блума в поле Земли в ячейке с парами $^{87}\text{Rb}$ для применения в магнитометрии

<sup>1,2</sup>Козлова Катерина Семеновна

<sup>1,2</sup>Бражников Денис Викторович, <sup>1,2,3</sup>Гончаров Андрей Николаевич

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup>Институт лазерной физики СО РАН

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет

<sup>1,2</sup>Макаров Антон Олегович

[k.kozlova1@g.nsu.ru](mailto:k.kozlova1@g.nsu.ru)

Приборы для измерения магнитного поля (МП), магнитометры, широко применяются во множестве областей науки и техники. Ранее считалось, что сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД) является одним из наиболее чувствительных типов магнитометров. Но в настоящее время больших чувствительностей достигли оптические магнитометры. Кроме того, оптические магнитометры имеют ряд преимуществ при измерении малых МП: небольшой размер, работа при комнатной температуре, высокая чувствительность, низкая цена по сравнению со СКВИД. Некоторые разновидности оптических магнитометров, в том числе представленный в данной работе, измеряют МП в абсолютных единицах измерения, в отличие от СКВИД, измеряющих МП в относительных единицах измерения.

Рассмотрим прохождение непрерывной световой волны с круговой поляризацией через кювету с атомами щелочного металла. В случае создания амплитудной модуляции, например, при помощи акустооптического модулятора (АОМ), на частоте Лармора, соответствующей модулю постоянной компоненты МП (в данной работе частота Лармора устанавливалась 160 кГц в экранированной среде и была равна 450 кГц в поле Земли), будет наблюдаться изменение в поглощении излучения в кювете. При сканировании частоты Лармора с некоторой девиацией будет наблюдаться лоренцевский контур, описывающий наблюдаемый сигнал – магнитооптический резонанс. Описанная схема регистрации магнитооптических резонансов работает на основе классической схемы Белла-Блума [1]. Излучение на длине волны, резонансной оптическому переходу в  $D_1$  линии  $^{87}\text{Rb}$  (795 нм), мощностью 750 мкВт и диаметром пучка 5 мм проходило через кубическую кювету с гранью 5 мм, заполненную щелочным металлом  $^{87}\text{Rb}$  и буферным газом  $\text{N}_2$  300 Торр. Кювета находилась в трёхслойном магнитном экране, подавляющем внешнее МП на пять порядков в объёме кюветы. Постоянная компонента МП, направленная перпендикулярно волновому вектору излучения, создавалась при помощи катушек Гельмгольца. Для регистрации резонансов Белла-Блума использовалась техника синхронного детектирования.

Для получения большей чувствительности магнитометра классическая схема Белла-Блума была модифицирована: вместо циркулярно поляризованной волны мы предлагаем использовать эллиптически поляризованную волну, а магнитооптические резонансы наблюдать с помощью поляриметра [2]. Такую волну можно представить в виде суперпозиции волны накачки и пробной волны, обладающими противоположными круговыми поляризациями. Похожая конфигурация была исследована ранее для наблюдения резонансов Ханле, но с двумя встречными линейно поляризованными волнами [3]. На выходе из кюветы резонансы могут исследоваться в интенсивности каждой из волн по отдельности, либо с помощью дифференциального канала балансного фотодетектора. В предложенной схеме наблюдается эффект смены знака магнитооптического резонанса, наблюдаемого в канале фотодетектора, соответствующего пробной волне. А именно, вместо увеличения амплитуды модуляции интенсивности на выходе из кюветы при совпадении частоты модуляции с частотой Лармора, что имеет место в классической схеме, наблюдалось уменьшение амплитуды модуляции света. При использовании дифференциального канала фотодетектора, на котором сигналы от волны накачки и пробной волны вычитаются, наблюдается магнитооптический резонанс со значительно улучшенным отношением сигнал/шум.

Предложенная модификация стандартной схемы Белла-Блума интересна для дальнейших приложений в квантовой магнитометрии для создания компактного атомного магнитометра. Для обеих схем были измерены параметры резонанса в зависимости от оптической мощности излучения и температуры паров в кювете, а также произведены оценки чувствительности измерений магнитного поля. Так, в модифицированной схеме она достигает 300 фТл/МГц против 30 пТл/МГц в классической. Также были проведены эксперименты по наблюдению резонансов Белла-Блума в условиях земного магнитного поля (рис. 1).

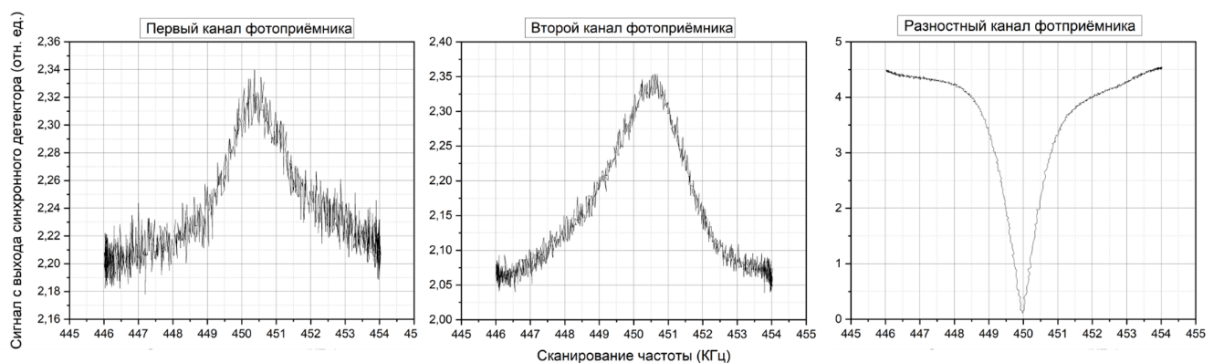


рис.1. Магнитооптические резонансы, зарегистрированные в модернизированной схеме Белла-Блума в земном поле с трёх каналов балансного фотоприёмника при температуре кюветы 85°C и эллиптичности 20 градусов.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00195).

Список публикаций:

- [1] Bell W.E., Bloom A.L. // *Phys Rev Lett.* 1961. Vol. 6, № 6. P. 280–281.  
 [2] Makarov. A. O. et al. // *JEP Letters*, 2023, Vol. 117, No. 7, P. 509–516.  
 [3] Brazhnikov D. V. et al. // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2019, Vol. 52.

## Стабилизация частоты полупроводникового лазера для экспериментов с одиночными атомами в оптических дипольных ловушках

*Прилуцкая Анна Александровна*

*Новосибирский государственный университет*

*Бетеров Илья Игоревич, к.ф.-м.н.*

*[a.prilutskaya@gsu.ru](mailto:a.prilutskaya@gsu.ru)*

Трехфотонное лазерное возбуждение  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2} \rightarrow 37P$  одиночных атомов рубидия, захваченных в оптическую дипольную ловушку, представляет интерес для исследования взаимодействия атомов в  $nP$ -состояниях, что невозможно при реализации широко используемой по всему миру двухфотонной схемы лазерного возбуждения ридберговских состояний, позволяющей возбуждать  $nS$ - и  $nD$ -состояния атомов [1].

На второй ступени  $5P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$  трехфотонного лазерного возбуждения используется полупроводниковый лазер с внешним резонатором Sacher Lasertechnik с длиной волны 1367 нм. Для реализации данного атомного перехода необходимо, чтобы полупроводниковый лазер обладал долговременной стабильностью частоты и узкой шириной линии лазерного излучения. Однако в полупроводниковых лазерах имеется ряд источников шумов – токовый шум (мерцательный шум), акустические шумы, шумы источников питания. Это приводит к уширению линии лазера, а тепловые явления приводят к долговременным дрейфам частоты.

В нашей работе была реализована стабилизация частоты полупроводникового лазера методом Паунда-Дривера-Холла, где частота лазерного излучения привязывается к одному из пиков пропускания высокостабильного интерферометра Фабри – Перо. После стабилизации частоты с использованием ПИД-регулятора Vescent Photonics D2-125 ширина линии лазера, оцененная по остаточному сигналу ошибки, составила 25 кГц. Для уточнения значения ширины линии был проведен эксперимент по оценке ширины спектра биений при самогетеродинамировании лазерного излучения [2] с использованием акустооптического модулятора для смещения частоты излучения на 80 МГц, оптоволоконной линии задержки длиной 25 км и спектроанализатора Rigol DSA815. Полученная оценка ширины линии по спектру биений составила менее 8 кГц.

Список публикаций:

1. Бетеров И.И и др. Трехфотонное лазерное возбуждение одиночных ридберговских атомов рубидия в оптической дипольной ловушке // *ЖЭТФ*, 2023, том 164, вып. 2 (8), стр. 282–290  
 2. Hanne Ludvigsen, Mika Tossavainen, Matti Kaivola Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay // *Optics Communications* 155 1998 180–186

## Разработка модели люминесценции квантовых точек CsPbBr<sub>3</sub> в приближении одиночного возбуждения

*Щербак Вячеслав Валерьевич*

*Новосибирский государственный университет*

*Французов Павел Анатольевич, к.ф.-м.н.*

*[shdaver@gmail.com](mailto:shdaver@gmail.com)*

Квантовые точки (КТ) имеют обширные перспективы применения в оптоэлектронике. Применение КТ в технике требует разработки теории их люминесценции, и в настоящее время обширно изучаются полупроводниковые КТ со структурой перовскита. Механизм люминесценции полупроводниковых КТ предложен в работе [1]. Из построенной теории люминесценции КТ можно будет впоследствии перейти к рассмотрению лазерной генерации в ансамблях КТ. В первом приближении можно считать, что КТ в ансамблях не взаимодействуют друг с другом, и использовать при расчётах результаты, полученные для одиночной точки. Испускание фотонов квантовыми точками происходит в результате рекомбинации электрон-дырочных пар, образованных в КТ под действием накачивающего излучения. Процессы образования и рекомбинации электрон-дырочных пар в КТ можно представить как марковскую цепь из трёх состояний: основного, возбуждённого и захваченного, соответствующих отсутствию электрон-дырочной пары, созданию пары и захвату электрона или дырки на дефектный энергетический уровень – ловушку – в запрещённой зоне. В приближении одиночного возбуждения рассматривается ситуация возникновения только одной электрон-дырочной пары в каждой КТ и считается, что из состояний, когда в КТ возникают две пары носителей зарядов, происходит очень быстрый переход к состоянию с одной парой. Тогда вероятностям переходов между тремя обозначенными состояниями будут соответствовать константы скоростей соответствующих процессов, происходящих в КТ: образования пары, излучательных и безызлучательных рекомбинаций из возбуждённого и захваченного состояний, захват электрона в ловушку и выход из неё. Для построенной марковской цепи можно записать систему прямых уравнений Колмогорова и условие нормировки вероятностей. Решением полученной системы для вероятности излучательного перехода является сумма двух экспонент с разными характерными временами и постоянного слагаемого, соответствующего шуму. Это решение имеет четыре параметра, которые находятся методом максимального правдоподобия из имеющихся экспериментальных данных по затуханию люминесценции ансамбля квантовых точек CsPbBr<sub>3</sub>. При использовании метода максимального правдоподобия считается, что вероятность испускания фотона квантовой точкой в определённый малый интервал времени подчиняется мультиномиальному распределению. Выбранный метод позволяет определить погрешности расчёта, которые в данном случае составляют меньше 5 %. Полученные параметры позволяют построить теоретические кривые затухания люминесценции и сопоставить их с люминесценцией ансамбля, наблюдаемой в эксперименте. Расчёт и эксперимент повторены для точек, синтезированных при разных температурах. Во всех случаях теоретические кривые соответствуют экспериментальным данным. Таким образом, люминесценция ансамбля КТ хорошо описывается найденной теоретической зависимостью в виде двух экспонент и постоянного слагаемого. В дальнейшем разработанную модель можно модифицировать для описания лазерной генерации на исследуемом ансамбле КТ.

Список публикаций:

[1] Podshivaylov E. A. et al. A quantitative model of multi-scale single quantum dot blinking // *Journal of Materials Chemistry art. no.* – 2023.

## 9 - Физическая химия, химическая физика

Алимов Дмитрий Валерьевич, м.н.с.

Новосибирск, Международный томографический центр, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Каркас UiO-66 с инкапсулированным спиновым зондом: механистическое исследование чувствительности к механическому давлению и гостевым молекулам**

Порываев Артем Сергеевич, к.х.н.

e-mail: [d.alimov@g.nsu.ru](mailto:d.alimov@g.nsu.ru) стр. 173

Антохина Ксения Витальевна, магистрант 1 года обучения

Дубна, Государственный университет «Дубна», Инженерно-физический институт

**Мессбауэровский эффект в аморфных средах**

Философов Дмитрий Владимирович, к.х.н.

e-mail: [antohina@jinr.ru](mailto:antohina@jinr.ru) стр. 174

Астахов Даниил Сергеевич, магистрант 2 года обучения

Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физико-технический фак-т

**Анализ процесса перехода к неустойчивому горению в плоских каналах**

Игорь Александрович Яковлев, к.ф.-м.н.

e-mail: [Daniil.S.Astakhov@yandex.ru](mailto:Daniil.S.Astakhov@yandex.ru) стр. 175

Афаунов Роман Эдуардович, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, факультет естественных наук

**Индекс металличности как мера делокализации электронной плотности на химической связи**

Мирзаева Ирина Валерьевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [r.afaunov@g.nsu.ru](mailto:r.afaunov@g.nsu.ru) стр. 176

Беликов Юрий Алексеевич, магистрант 2 года обучения

Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, факультет естественных наук

**Связь эффективности генерации •ОН с эффективностью фотолиза природных комплексов Fe<sup>3+</sup>**

Поздняков Иван Павлович, к.х.н.

e-mail: [y.belikov@g.nsu.ru](mailto:y.belikov@g.nsu.ru) стр. 177

Валиулина Ленара Ильмировна, аспирант 2 года обучения

Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физический факультет

**Квантово-химическое исследование структуры и ароматичности циклоуглеродов (C<sub>n</sub>, n=11-29)**

Валиев Рашид Ринатович, д.х.н.

e-mail: [valiulina-lenara@mail.ru](mailto:valiulina-lenara@mail.ru) стр. 178

Вергасова София Артуровна, 4 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет

**Интерпретация результатов экспериментов по термомиграции жидких включений в кристалле KBr**

Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.

e-mail: [svergasova@sfedu.ru](mailto:svergasova@sfedu.ru) стр. 179

Грапенко Ольга Юрьевна, аспирант 2 года обучения

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, Институт физики

**Исследование электронного и атомного строения полититанатов калия, модифицированных в водных растворах солей переходных металлов**

Власенко Валерий Григорьевич, д.ф.-м.н.

e-mail: [grapenko@sfedu.ru](mailto:grapenko@sfedu.ru) стр. 180

Евсеев Георгий Сергеевич, магистрант 1 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет, Институт неорганической химии им. А.В.Николаева СО РАН

**Стабильность разнолигандных ацетилацетонатных комплексов: квантово-химическое исследование**

Крючкова Наталья Анатольевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgosha@gmail.com](mailto:georgosha@gmail.com) стр. 181



Кокоренко Андрей Андреевич, магистрант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, естественных наук  
**Изучение фотохимии бипиридилного комплекса рутения(II), перспективного для применения в фотохимиотерапии**

Глебов Евгений Михайлович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [kaa090901@gmail.com](mailto:kaa090901@gmail.com) стр. 182

Лебедев Михаил Сергеевич, с.н.с.  
Новосибирск, Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН  
**Физико-химические основы и примеры практического применения технологии молекулярного наслаивания**

e-mail: [lebedev@niic.nsc.ru](mailto:lebedev@niic.nsc.ru) стр. 183

Новиков Михаил Владимирович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, факультет естественных наук, Институт химической кинетики и горения СО РАН  
**Изучение механизма фотодеградациии загрязнителя природных вод метронидазола в водных растворах**

Поздняков Иван Павлович, к.х.н.  
e-mail: [m.novikov@kinetics.nsc.ru](mailto:m.novikov@kinetics.nsc.ru) стр. 184

Сафин Роман Русланович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Механизм образования синглетного кислорода при фотовозбуждении золотых наночастиц**

Ершов Кирилл Сергеевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [safin.roman23@bk.ru](mailto:safin.roman23@bk.ru) стр. 184

Таможникова Вероника Сергеевна, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, естественных наук  
**Исследование механизмов фотоиндуцированных процессов для люминесцентных азагелиценов фуорохинолинового ряда**

e-mail: [y.tamozhnikova@g.nsu.ru](mailto:y.tamozhnikova@g.nsu.ru) стр. 186

Тютерева Юлия Евгеньевна, м.н.с.  
Новосибирск, Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, -  
**Влияние персульфата калия на минерализацию гербицида 2,4-DB под действием УФ облучения**

Поздняков Иван Павлович, к.х.н.  
e-mail: [Y57z@mail.ru](mailto:Y57z@mail.ru) стр. 187

Цай Иван Евгеньевич, 3 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, Институт химической кинетики и горения СО РАН, естественных наук

**Исследование механизма фотолиза сукцинатного комплекса железа(III) в водном растворе**

Поздняков Иван Павлович, к.х.н.  
e-mail: [i.tsai@g.nsu.ru](mailto:i.tsai@g.nsu.ru) стр. 188

Четвериков Артём Олегович, магистрант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Зависимость реакционного радиуса диффузионно-контролируемой реакции захвата заряда на полимерную цепь от величины валентного угла**

Боровков Всеволод Игоревич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [a.chetverikov@g.nsu.ru](mailto:a.chetverikov@g.nsu.ru) стр. 189

Ширяева Анастасия Андреевна, аспирант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Строение и биологические свойства комплексов меди(II) на основе β-аминовинилкетонс с N-нафтил и N-хинолил заместителями**

Власенко Валерий Григорьевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [anastasia.shiryayeva00@mail.ru](mailto:anastasia.shiryayeva00@mail.ru) стр. 190

# МОКП UiO-66 с инкапсулированным спиновым зондом: механистическое исследование чувствительности к механическому давлению и молекулам-гостям

Алимов Дмитрий Валерьевич

Новосибирский государственный университет

Порываев Артем Сергеевич

[d.alimov@g.nsu.ru](mailto:d.alimov@g.nsu.ru)

Металл-органические координационные полимеры представляют собой перспективный класс соединений с высокой гибкостью каркаса и большим структурным разнообразием. Возможность настройки функциональных свойств МОКП обосновывает перспективность их использования, в частности, для адсорбции и хранения газов, катализа, разделения газовых и жидкофазных смесей.

Для многих практических применений важны такие параметры, как форма и доступность пор. В настоящий момент для получения этой информации чаще всего используют рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА), позволяющую идентифицировать фазовый состав материала и выявить структурные изменения при внешнем воздействии или адсорбции газа. Однако РФА позволяет получить лишь информацию о составе фаз, но не позволяет сделать вывод о состоянии пор и их доступности для адсорбированных молекул. В данной работе мы применяем разработанный в ЛЭПР МТЦ СО РАН метод анализа спектров стационарного электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), в котором на этапе синтеза спиновый зонд инкапсулируется в поры МОКП. На спектр ЭПР влияет динамика зонда, отражающая его окружение, что позволяет делать выводы не только о молекулах-гостях, но и о геометрии каркаса МОКП.

В данной работе представлены результаты исследования модельной системы - МОКП UiO-66 с инкапсулированным нитроксильным радикалом ТЕМРО. Для моделирования спектров ЭПР использовалась модель, основанная на стохастическом уравнении Лиувилля с упорядоченным потенциалом. Несмотря на то, что UiO-66 является механически стабильным MOF до 1.4 ГПа, спектры ЭПР изменяются при различных давлениях. Давление более 0.13 ГПа приводит к изменению спектра ЭПР (рис. 1) из-за замедления вращения нитроксильного радикала. Замедление вращения радикала обусловлено заполнением полости свободными линкерами распавшихся.

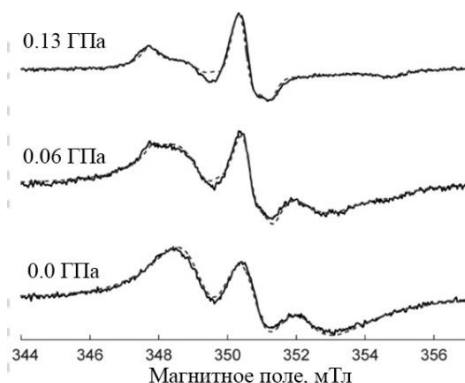


рис.1. Спектры стационарного ЭПР  $\text{TEMPO}@UiO-66$  в X-диапазоне при комнатной температуре, измеренные после воздействия на него различных давлений 0–0.13 ГПа. Пунктирными линиями показаны смоделированные спектры ЭПР.

Для интерпретации динамики ТЕМРО было проведено моделирование классической молекулярной динамики (МД). Для моделирования разрушения каркаса были рассчитаны серии МД-траекторий (298 К, 100 нс) для ТЕМРО в поре UiO-66 для случая удаления [0, 1, 2, 3] линкеров и замены [1, 2, 3] линкеров на терефталевую кислоту. Несмотря на то, что локальная плотность среды ТЕМРО уменьшается (рис. 1, а), время вращательной корреляции, наоборот, увеличивается (рис. 2, б), поскольку снижение симметрии пор снижает вероятность перехода N-O фрагмента ТЕМРО между окнами пор UiO-66. Взаимодействие с OH-группами терефталевой кислоты вызывает значительную иммобилизацию радикала. Эти наблюдения объясняют существование двух фракций ТЕМРО (подвижной и неподвижной), детектированных с помощью ЭПР. Подвижная фракция соответствует ТЕМРО, находящемуся в поре с удаленными линкерами, а неподвижная фракция соответствует ТЕМРО в порах, частично занятых терефталевой кислотой. Обратное распределение Лапласа, примененное к вращательной автокорреляционной функции ТЕМРО (рис. 2 в), позволяет выделить различные типы движения радикала: малоугловые либрации и вращательное движение с большей амплитудой. При удалении линкеров происходит уменьшение интенсивности движения второго типа, что является основной причиной увеличения времени вращательной корреляции.

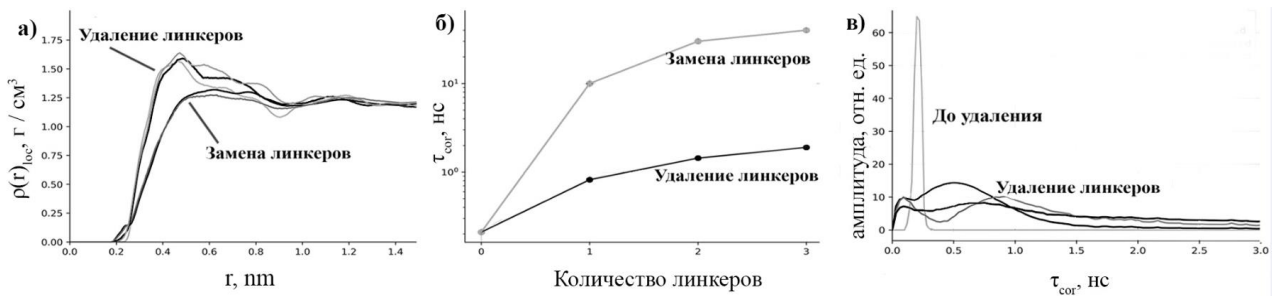


рис.2. а) Локальная плотность окружения нитроксильного радикала.

б) Зависимость времени вращательной корреляции от количества удаленных/замещенных линкеров UIO-66

в) Обратное преобразование Лапласа вращательной автокорреляционной функции нитроксильного радикала

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 22-73-10239)

Список публикаций:

[1] A. Sheveleva, A. Anikeenko, A. Poryvaev // *Journal of Physical Chemistry*. 2017. V. 121. P. 19880-19886.

[2] R. Verploegh, A. Kulkarni // *Journal of Physical Chemistry*. 2019. V. 14. P. 9153-9167.

## Мессбауэровский эффект в аморфных средах

Антохина Ксения Витальевна<sup>1,2</sup>

Баймуханова Аягоз<sup>2</sup>, Величков Атанас Иванов<sup>2</sup>, Караиванов Димитр Веселинов<sup>2</sup>, Кубрин Станислав Петрович<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Государственный университет «Дубна»

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета

Философов Дмитрий Владимирович<sup>1,2</sup>, к.х.н.

[antohina@jinr.ru](mailto:antohina@jinr.ru)

Обычно ядерный гамма-резонанс рассматривается как метод исследования твердых тел, но в данной работе метод был использован для исследования аморфных материалов. Ионообменные материалы за счет своей специфической структуры нашли широкое применение при разделении смесей ионов, концентрировании микроэлементов из разбавленных растворов, в процессах очистки растворов, воды, реактивов [1,2]. Уже проводились подобные исследования мессбауэровского эффекта в ионообменниках [3,4], правда исследовались не совсем классические смолы. В этих статьях как раз и проявлялась фундаментальная сложность контроля всех форм железа в смоле. В данной работе исследовался катионит Dowex 50x8. Были использованы растворы: 1) 0.1M  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ; 2) 0.1M  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 + 0.3\text{M HNO}_3$ .

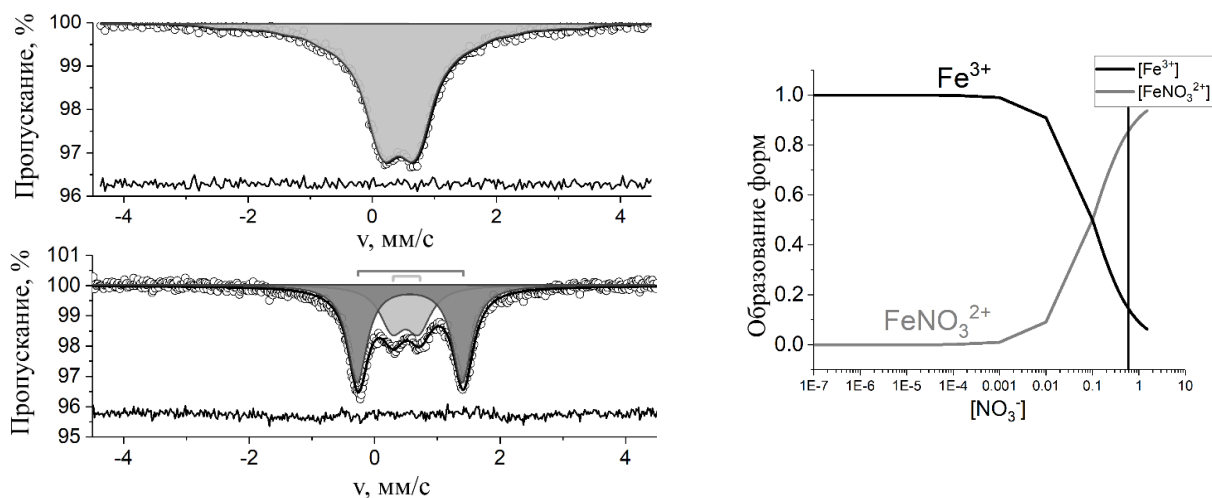


рис.1. Мессбауэровские спектры ионообменной смолы. А) Катионообменная смола, промытая в 0.1M растворе  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ; Б) Катионообменная смола, промытая в 0.1M растворе  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , подкисленном до 0.3M  $\text{HNO}_3$

рис.2. Predominance-диаграмма для нитрата железа (III), описывающие содержание разных форм железа в растворе.

Судя по predominance-диаграммам (рис. 2), мы наблюдаем на спектрах (рис. 1) несколько форм железа:

1. В катионите мы предполагаем, что наблюдали следующие формы железа:  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5]^{3+}$ ,  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{NO}_3]^{2+}$ ,  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}]^{2+}$ ,  $\text{FeOOH}$ ;
2. В смоле, промытой в подкисленном растворе нитрата железа, мы предполагаем наличие форм  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5]^{3+}$ ,  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{NO}_3]^{2+}$ .

Также важно отметить, что в исследовании ионообменных смол 1967 года [5] было выдвинуто предположение о сильном влиянии на спектры  $\text{FeOOH}$  и наблюдались спектры, подобные нашим (рис. 1, В), но, как известно, степень гидролиза снижается в кислой среде, а именно в подкисленном растворе мы пронаблюдали спектры с двумя дублетами, сильно отличающимися по квадрупольным расщеплениям. Соответственно, мы предполагаем, что наблюдали на спектрах с подкисленным раствором не гидроксид железа, а другие формы, описанные выше. Таким образом, данные эксперименты показали, во-первых, возможность исследования аморфных материалов с помощью метода ядерного гамма-резонанса, во-вторых, возможность определения форм железа на смоле, что в целом является достаточно проблематичным.

Список публикаций:

[1] Мархол М. Ионообменники в аналитической химии: в 2-х ч./пер. с англ. – 1985.

[2] Ярославцев, А. Б., & Никоненко, В. В. (2009). Ионообменные мембранные материалы: свойства, модификация и практическое применение. *Российские нанотехнологии*, 4(3-4), 44-65.

## **Анализ процесса перехода к неустойчивому горению в плоских каналах**

*Астахов Даниил Сергеевич<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

*Яковлев Игорь Александрович<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.*

*[den\\_astakhov@mail.ru](mailto:den_astakhov@mail.ru)*

Разработка микрогорелок и их промышленное применение требуют глубокого понимания соответствующей физики, включая динамику угасания пламени при экстремальных потерях тепла. Однако такие горелки демонстрируют феномен неустойчивости горения при приближении к пределам воспламеняемости, что затрудняет их разработку и оптимизацию [1].

Процесс сжигания топлива в микрогорелках происходит в условиях рециркуляции тепла и повышенной температуры прилегающих стенок. Для изучения явления горения в столь ограниченных пространствах используется базовая упрощенная модель, состоящая из узкого канала с внешним обогревом и контролируемым профилем температуры стенок. Марута и др. [2] определили характерные режимы горения в таком узком канале при постепенном уменьшении скорости потока: нормальное стабильное пламя, режим с периодическим угасанием и поджигом (неустойчивость), и рестаблизация в виде слабого пламени при сверхнизких скоростях потока. Авторы обнаружили, что цикл колебаний пламени состоит из характерных стадий: (1) распространение пламени вверх по потоку; (2) гашение в условиях критических тепловых потерь; (3) заполнение канала свежей смесью до точки воспламенения; (4) воспламенение в области, где температура стенок достаточно высока. Этот механизм был отражен в названии этого явления – пламя с повторяющимся угасанием и поджигом (в англоязычной литературе используется аббревиатура FREI).

В данном исследовании рассматривается процесс перехода между устойчивым и неустойчивым режимом горения бедной метановоздушной смеси в плоских каналах различной ширины (от 0,85 до 2 мм). Такая задача решалась численно, путем прямого двухмерного моделирования. В расчетной области решались уравнения сохранения массы, импульса, энергии и массовой концентрации, для каждого компонента смеси. Химическая реакция моделировалась с помощью двухступенчатой полуэмпирической модели, предложенной Франзелли (Franzelli) [3]. На основе полученных результатов были построены диаграммы зависимости максимальной скорости тепловыделения от скорости смеси на входе. Бифуркационная диаграмма для канала шириной 1,5 мм показана на рис. 1. По результатам параметрического моделирования были сделаны следующие выводы.

Между режимом устойчивым, стационарным пламенем и режимом с периодическим угасанием и поджигом (FREI) был обнаружен переходный режим, характеризующийся меньшей амплитудой пульсаций и отсутствием полного затухания. Также было показано, что несмотря на существование переходного пульсирующего режима, сам переход между режимами горения является докритическим (жесткая бифуркация). Во всех рассмотренных случаях наблюдался эффект гистерезиса. Расположение точки бифуркации и амплитуда минимального предельного цикла зависят от направления изменения входной скорости потока.

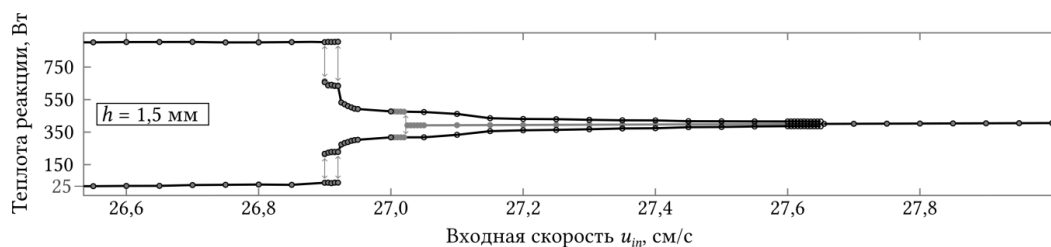


рис.1. Бифуркационная диаграмма, демонстрирующая максимальную теплоту реакции в канале, в зависимости от входной скорости  $u_{in}$  для ширины канала  $h = 1,5$  мм

Список публикаций:

- [1] Fateev G. A., Rabinovich O. S., Silenkov M. A. *Oscillatory combustion of a gas mixture blown through a porous medium or a narrow tube // Symposium (International) on Combustion. 1998. T. 27. № 2. С. 3147–3153.*  
 [2] Maruta K. и др. *Characteristics of Microscale Combustion in a Narrow Heated Channel // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2004. T. 40. № 5. С. 516–523.*  
 [3] Franzelli B. и др. *Large Eddy Simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame // Combustion and Flame. 2012. T. 159. № 2. С. 621–637.*

## Индекс металличности как мера делокализации электронной плотности на химической связи

Афаунов Роман Эдуардович

Новосибирский государственный университет

Мирзаева Ирина Валерьевна, к.ф.-м.н.

[r.afaunov@g.nsu.ru](mailto:r.afaunov@g.nsu.ru)

Квантовая теория атомов в молекулах (QТАИМ) исследует распределение электронной плотности (ЭП). Особое значение в теории QТАИМ имеют 4 типа критических точек: ядерный аттрактор, связевая, клеточная и кольцевая критические точки, соответствующие максимуму, седлам и минимуму электронной плотности соответственно. Наибольшие значения для анализа химических систем имеют связевые критические точки, соответствующие взаимодействию между двумя атомами. Для описания межатомных взаимодействий используют дескрипторы, представляющие собой значения различных функций в связевой критической точке. Например, электронная плотность  $\rho$ , её лапласиан  $\Delta\rho$ , плотности потенциальной  $V$  и кинетической  $G$  энергий, эллиптичность  $e$ , индекс металличности  $\xi_m$  и отношение плотностей энергий  $|V|/G$ . Теория QТАИМ позволяет предсказать и объяснить свойства для многих видов химических связей, однако её слабым местом является описание степени делокализации электронов и, соответственно, описание связей с предполагаемой высокой электронной делокализацией.

Индекс металличности [1] – относительно новый и пока редко встречающийся дескриптор химической связи, который определяется как

$$\xi_m = \frac{36(3\pi^2)^{\frac{2}{3}}}{5} \cdot \frac{\rho^{\frac{5}{3}}(r)}{\Delta\rho(r)}. \quad (1)$$

В настоящей работе была исследована связь индекса металличности с другими дескрипторами химической связи, рассчитаны значения индекса металличности для ряда молекулярных и кристаллических систем. Показано, что индекс металличности действительно связан с делокализацией электронов на химической связи, но не предсказывает металлические свойства веществ.

Расчёты выполнялись в программном комплексе AMS2021 [2]. Во всех случаях использовались полноэлектронные базисы, состоящие из орбиталей слэтеровского типа TZ2P/ADF. Расчёты проводились в рамках теории функционала плотности с функционалом PBE-D3(BJ). Скалярные релятивистские эффекты учитывались на уровне нулевого порядка регулярного приближения. Геометрия изолированных молекул оптимизировалась. Для периодических систем геометрические параметры брались для нормальных условий из базы данных программы AMS2021. Так как значения электронной плотности и её лапласиана в районе связевых критических точек в кристаллах Li, Na, K и Cs очень маленькие, возникают проблемы при их поиске средствами программы AMS2021. Поэтому для более точного анализа распределения электронной плотности в этих случаях использовалась программа Critic2 [3].

Список публикаций:

- [1] Ayers P. W., Jenkins S. // *Computational and Theoretical Chemistry. 2015. T. 1053. С. 112-122.*  
 [2] AMS, SCM, *Theoretical Chemistry, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, http://www.scm.com*  
 [3] Otero-de-la-Roza A. et al. // *Computer Physics Communications. 2009. T. 180. №. 1. С. 157-166.*

## Связь эффективности генерации •ОН с эффективностью фотолиза природных комплексов Fe<sup>3+</sup>

Беликов Юрий Алексеевич<sup>1, 2</sup>

Тютерева Юлия Евгеньевна<sup>1, 2</sup>, Снытникова Ольга Александровна<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН

<sup>3</sup>Институт «Международный томографический центр» СО РАН

Поздняков Иван Павлович<sup>1, 2</sup>, к.х.н.

[y.belikov@g.nsu.ru](mailto:y.belikov@g.nsu.ru)

Комплексы Fe<sup>3+</sup> с природными карбоновыми кислотами находят широкое применение в качестве фотоактивных соединений в экологической химии. Такие системы являются перспективными для использования в процессах глубоко окисления приоритетных загрязнителей водной среды благодаря высокой эффективности генерации активных форм кислорода (АФК), в основном гидроксильного (•ОН) радикала. Генерация •ОН основана на известном каталитическом процессе разложения перекиси водорода в присутствии ионов Fe<sup>2+</sup>. В системах железо – природная кислота генерация как перекиси, так и ионов Fe<sup>2+</sup> происходит в ходе фотолиза начального карбоксилатного комплекса.

Большое разнообразие природных карбоновых кислот, выступающих в качестве лигандов, делает необходимым сравнение окислительного потенциала комплексов для нахождения оптимальных вариантов их применения. Надежными сравнительными параметрами могут выступать квантовые выходы фотолиза комплекса и генерации гидроксильного радикала, позволяющие оценивать эффективность как самого процесса фотолиза, так и эффективность генерации окислительных агентов.

В нашей работе мы предлагаем простой подход к измерению квантовых выходов генерации •ОН при фотолизе комплексов Fe<sup>3+</sup> с природными карбоновыми кислотами, основанный на использовании гидросокомплекса железа FeOH<sup>2+</sup> в качестве калибровочной системы с известным квантовым выходом •ОН и бензола в качестве селективной ловушки на гидроксильный радикал. Отдельное внимание было уделено термическим процессам, происходящим в ходе облучения и после его прекращения, приводящим к значительному увеличению квантового выхода гидроксильного радикала и необходимости коррекции величин квантовых выходов фотолиза самих комплексов.

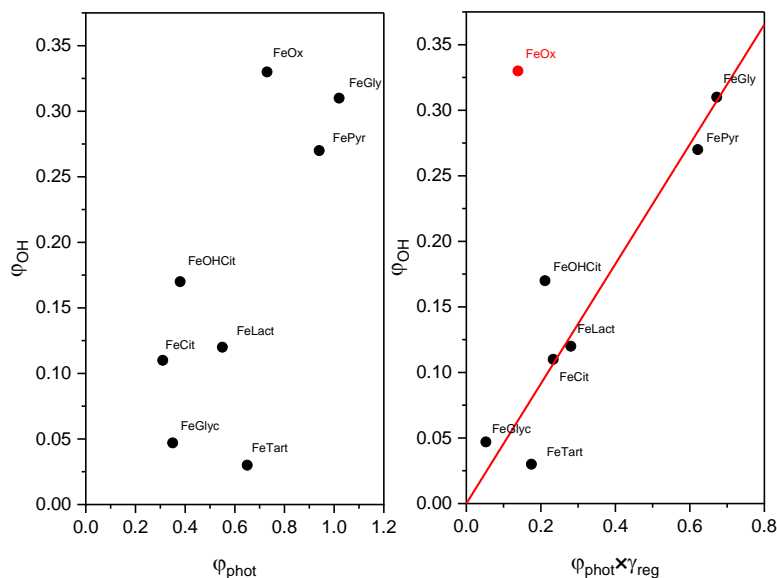
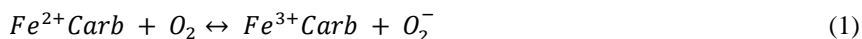


рис.1. Зависимость квантовых выходов образования •ОН комплексов Fe<sup>3+</sup> состава 1:1 от: а) квантовых выходов фотолиза; б) «эффективных» квантовых выходов фотолиза, а также линейная аппроксимация зависимости (красная прямая)

Итогом работы являются впервые корректно измеренные с учетом темновых процессов квантовые выходы фотолиза и генерации •ОН для широкого спектра комплексов Fe<sup>3+</sup> с природными карбоновыми кислотами. Наилучшую генерацию •ОН радикала показали системы с близкими по строению лигандами – оксалат, пируват и глиоксалат. Показано, что кроме абсолютных значений квантовых выходов фотолиза, для процесса важным фактором является ОВ-равновесие между формами Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup> (1):



Перейдя к «эффективным» квантовым выходам фотолиза, учитывающих процент регенерации Fe<sup>3+</sup>, приводящий к образованию АФК, зависимость квантовых выходов генерации •ОН от квантовых выходов фотолиза комплексов удается линеаризовать (рис. 1). Полученные результаты представляют огромный интерес для экологической фотохимии, так как позволяют быстро и достоверно оценивать эффективность генерации гидроксильного радикала лишь по параметрам фотолиза самого комплекса. Однако, следует учитывать не только эффективность генерации радикала, но и стабильность комплексов в используемых системах и «сложность» самого лиганда. Так, из выделенных эффективных комплексов – оксалатный, пируватный и глиоксолатный - только оксалатная система может быть рекомендована к использованию в связи с большей устойчивостью соответствующих комплексов в широком диапазоне рН и наименьшей константой скорости оксалатаного лиганда непосредственно с •ОН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-23-00097).

## Квантово-химическое исследование структуры и ароматичности циклоуглеродов (C<sub>n</sub>, n=11-29)

*Валиулина Ленара Ильмировна*

*Томский государственный университет*

*Валиев Рашид Ринатович*

*[valiulina-lenara@mail.ru](mailto:valiulina-lenara@mail.ru)*

Углерод является уникальным химическим элементом, обладающим наибольшим количеством аллотропных модификаций, которые различаются химической структурой, что отражается на их особых физико-химических свойствах. В 2019 году экспериментально было продемонстрировано существование новой аллотропной модификации углерода – циклоуглерод (C<sub>18</sub>) [1]. За успешным синтезом C<sub>18</sub> последовали многочисленные исследования свойств и структуры других форм циклоуглеродов [2].

В данной работе проводилось квантово-химическое исследование структуры и ароматичности циклоуглеродов (C<sub>n</sub>, n=11-29), состоящих из нечетного числа атомов углерода. Расчеты молекулярной структуры в нижнем синглетном и триплетном состояниях были получены с помощью *ab initio* метода на уровне CASSCF/6-31G(d,p) с активным пространством (14,12). Ароматичность циклоуглеродов исследовалась на основе вычисления магнитно-индуцированных токов с помощью метода GIMIC.

В ходе работы было установлено, что циклоуглероды с нечетным числом атомов имеют локализованную карбеновую структуру с синглетным основным состоянием. Структуры C<sub>21</sub>, C<sub>25</sub> и C<sub>29</sub> имеют квазивыврожденное синглет-триплетное основное состояние. Полученные равновесные структуры циклоуглеродов характеризуются острым углом на карбеновом атоме ( $\theta$ ) (рис. 1). Неподделенная электронная пара располагается на p<sub>in</sub> орбитали карбенового атома и не участвует в сопряжении, образованном  $\pi_{out}$  электронами. В результате этого электронная делокализация в молекулярном кольце включает четное число электронов как в  $\pi_{in}$ , так и в  $\pi_{out}$ -сопряженных системах. Количество электронов в  $\pi_{out}$ -сопряженной системе циклоуглеродов определяет их характер ароматичности. Циклоуглероды с  $n=4k+1$  являются антиароматичными, в то время как структуры с  $n=4k+3$  ароматичные. При больших значениях k циклоуглероды с нечетным числом атомов, также как и структуры с четным числом атомов являются неароматическим [3].

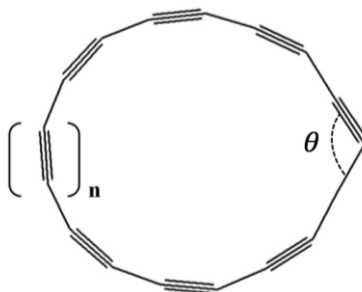


рис.1. Молекулярная структура циклоуглеродов (C<sub>n</sub>, n=11-29) с нечетным числом атомов

Список публикаций:

[1] Kaiser K., Scriven L. M., Schulz F., et al. An *sp*-Hybridized Molecular Carbon Allotrope, Cyclo[18]Carbon // *Science*. 2019. Vol. 365. P. 1299.

[2] Baryshnikov G. V, Valiev R. R., Valiulina L. I., et al. Odd-Number Cyclo[ n]Carbons Sustaining Alternating Aromaticity // *J Phys Chem A*. 2022. Vol. 126. P. 2445.

[3] Baryshnikov G. V, Valiev R. R., Nasibullin R. T., et al. Aromaticity of Even-Number Cyclo[n]carbons (n = 6–100) // *J Phys Chem A*. 2020. Vol. 124. P. 10849.

# Интерпретация результатов экспериментов по термомиграции жидких включений в кристалле КВг

*Вергасова София Артуровна*  
Южный федеральный университет  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
[svergasova@sfedu.ru](mailto:svergasova@sfedu.ru)

Термомиграция (процесс движения жидких включений внутри твердого тела под действием градиента температуры) представляет интерес как метод локального легирования полупроводниковых материалов и создания на этой основе различных полупроводниковых приборов.

Основными параметрами этого процесса являются скорость включения и их форма во время миграции, которые в свою очередь зависят от межфазной кинетики и анизотропии удельной межфазной энергии. Для того чтобы можно было управлять миграцией включений, их скоростью и формой, важно правильно понимать, каковы механизмы межфазных процессов, каковы значения тех коэффициентов, которыми они характеризуются, какова удельная межфазная энергия и степень ее анизотропии.

Для ответа на эти вопросы, очевидно, требуется иметь, с одной стороны, экспериментальные данные о миграции включений, об их форме и скорости, а с другой стороны, адекватные модельные представления об этом процессе, на основе которых могут корректно интерпретироваться результаты экспериментов.

Цель данного исследования заключалась в интерпретации экспериментальных данных о миграции искусственно созданных включений водного раствора КВг в кристалле КВг [1] на основе опубликованной модели скорости и формы сечения мигрирующего включения [2].

Выбор системы КВг-Н<sub>2</sub>О для исследования обусловлен несколькими причинами. Во-первых, эти кристаллы прозрачны в области видимого света, что позволяет наблюдать включение в режиме реального времени с помощью, например цифрового микроскопа с параллельной записью видеoinформации на компьютер. Во-вторых, при формировании включений внутри этого кристалла их образуется достаточно большое количество разного объема, что позволяет при проведении эксперимента наблюдать различие их скоростей и форм в практически идентичных условиях для них всех. В-третьих, эксперимент по термомиграции жидких включений КВг-Н<sub>2</sub>О не требует высоких температур и вакуумирования нагревательной системы (как в случае полупроводниковых кристаллов) и проводится при температурах, близких к комнатным.

Результаты экспериментального исследования для системы КВг-Н<sub>2</sub>О были представлены в работе [1]. Однако, для более детального изучения возникла необходимость в систематизации этих экспериментальных данных и в их интерпретации на основе модели миграции четырехгранных (в сечении) включений [2].

Из модели [2] следует, что характер зависимости скорости включений ( $V$ ) от градиента температуры ( $G$ ) различен для случая зародышевого и дислокационного механизмов, что можно использовать при выявлении действующего механизма по экспериментальным данным. Анализ измеренных в работе [1] (*рис.1а*) зависимостей  $V(G)$  в большей степени указывает на зародышевый механизм межфазных процессов, однако, этот вывод требует дополнительных исследований и уточнения, поскольку не исключен вариант дислокационного механизма с начальным кинетическим барьером.

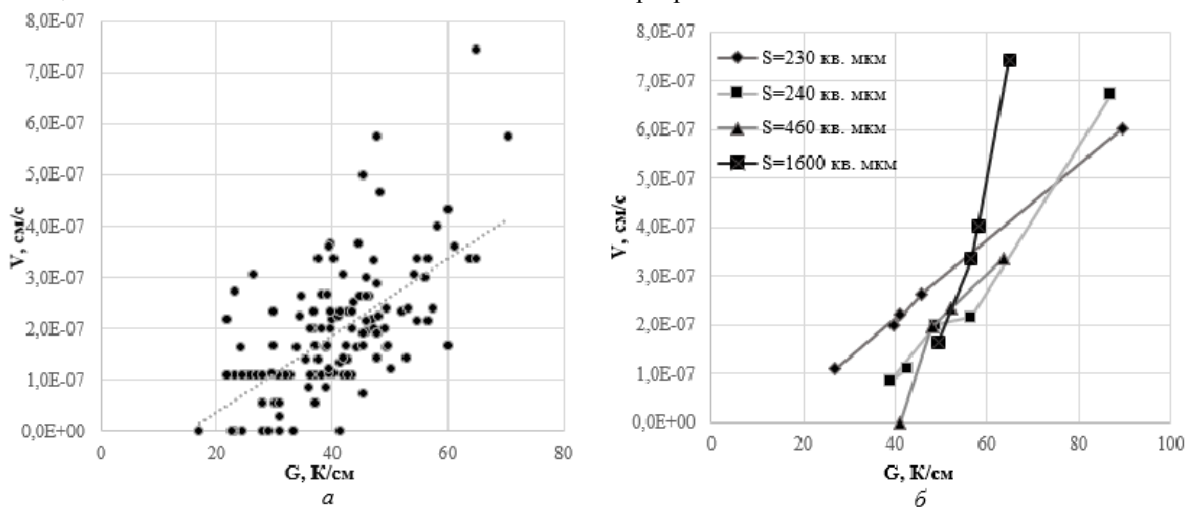


рис.1. Зависимость  $V(G)$ , построенная по результатам работы [1] (а), их систематизация с учетом объема (площади сечения  $S$ ) включений (б)



Систематизация экспериментальных данных на *рис.1а* по площадям (S) сечения включений, представленная на *рис.1б*, выявила следующую закономерность: для включений малого объема характерен относительно малый наклон зависимости V(G) и малый ее сдвиг относительно начала координат. В докладе будут представлены возможные объяснения обнаруженной закономерности.

Список публикаций:

[1] Иришин А.Г. // В сб. материалов ВНКФ-26, 2022, с. 69.

[2] Гармашов С.И. Модель термомиграции жидких цилиндрических включений в кристалле и ее применение: монография: Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2022. 101 с.

## **Исследование электронного и атомного строения полтитанатов калия, модифицированных в водных растворах солей переходных металлов**

**Грапенко Ольга Юрьевна**

*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики*

*Власенко Валерий Григорьевич, д.ф.-м.н.*

*[grapenko@sfedu.ru](mailto:grapenko@sfedu.ru)*

Полтитанаты калия (ПТК) представляют собой группу соединений, имеющих слоистую структуру типа голландита, сформированную спаренными титан-кислородными октаэдрами. Синтезированные по методике [1] твердые растворы ПТК, модифицированные в водных растворах солей переходных металлов, имеют состав  $K_xM_yTi_{(8-y)}O_{16}$  и обладают уникальными функциональными свойствами: колоссальной диэлектрической проницаемостью и высокими фотокаталитическими характеристиками, что определяет актуальность исследования их электронного и атомного строения. В настоящей работе были исследованы образцы ПТК, полученные после термически обработанный порошка  $TiO_2$  в гидроксидно-солевом расплаве  $KNO_3/KOH$ : полтитанат калия  $TiO_2 \cdot 4.1K_2O$  (ПТК исх.), свойства которого подробно описаны в статье [1], и модифицированные ПТК с внедренными ионами хрома –  $K_{1.6}Cr_{1.2}Ti_{7.2}O_{16}$  (ПТК-Cr), марганца –  $K_{1.43}Mn_{1.6}Al_{0.4}Ti_6O_{16}$  (ПТК-Mn), кобальта –  $K_{1.2}Co_{0.6}Ti_{7.4}O_{16}$  (ПТК-Co), железа –  $K_{1.46}Fe_{0.8}Ti_{7.74}O_{16}$  (ПТК-Fe) и меди –  $K_{1.53}Cu_{0.76}Ti_{7.24}O_{16}$  (ПТК-Cu). Химический состав полученных ПТК уточнен по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Морфология и кристаллическое строение исследованных ПТК были изучены методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеновской дифракции порошка. Показано, что исходный ПТК и ПТК, модифицированные переходными металлами, представляют собой рентгеноаморфные конгломераты микроразмерных и наноразмерных чешуйчатых частиц. Отсутствие рефлексов на дифрактограммах ПТК исходного и модифицированных ПТК указывает на то, что области когерентного рассеяния рентгеновского излучения в этих образцах очень малы (несколько нанометров).

Изменения валентного состояния Ti, Cr, Mn, Co, Fe и Cu были изучены методами РФЭС и анализа XANES Cr/Mn/Co/Fe/Cu K-краев рентгеновских спектров поглощения. Методом РФЭС определено наличие различных степеней окисления титана  $Ti^{4+}$  и  $Ti^{3+}$  в ПТК, соотношение которых значительно меняется в исходном и интеркалированных образцах. Соотношение количества  $Ti^{4+}$  и  $Ti^{3+}$  в ПТК, полученное из разложения РФЭС  $Ti2p$  линий приведены в таблице:

<b>Образец</b>	<b><math>Ti^{4+} \pm 0.5, \text{ at.}\%</math></b>	<b><math>Ti^{3+} \pm 0.5, \text{ at.}\%</math></b>
ПТК исх.	96.1	3.9
ПТК-Cr	72.00	28.00
ПТК-Mn	90.60	9.4
ПТК-Co	100.00	-
ПТК-Fe	78.20	21.8
ПТК-Cu	74.26	25.74

Как видно из данных таблицы, для ПТК-Cr, ПТК-Fe, ПТК-Cu количество  $Ti^{3+}$  увеличилось более чем в 5 раз, в ПТК-Mn, количество так же возросло почти в 3 раза, и в образце ПТК-Co наблюдается полное отсутствие  $Ti^{3+}$  по сравнению с исходным ПТК.

Определены валентные состояния ионов переходных металлов в ПТК, полученные из анализа XANES K-края соответствующих металлов: 1) Ионы хрома в ПТК- Cr находятся как в состоянии  $Cr^{3+}$  так и в  $Cr^{4+}$ , промежуточное положение между  $Cr_2O_3$  и  $CrO_2$ ; 2) Ионы марганца в ПТК- Mn находятся как в состоянии  $Mn^{3+}$ , так и в  $Mn^{4+}$ , промежуточное состояние между  $Mn_2O_3$  и  $MnO_2$ ; 3) Ионы кобальта в ПТК-Co находятся только в состоянии  $Co^{2+}$ ; 4) Ионы железа в ПТК-Fe находятся преимущественно в  $Fe^{3+}$  состоянии 90% и в  $Fe^{2+} \sim 10\%$ , что близко к  $Fe_2O_3$ ; 5) Ионы меди в ПТК-Cu находятся преимущественно в  $Cu^{2+}$  состоянии ~95%.

На основании анализа результатов проведенных экспериментальных исследований предложен механизм структурных превращений в исследованных системах твердых растворов ПТК, модифицированных в водных растворах солей переходных металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности, проект №FENW-2023-0014).

Список публикаций:

[1] Gorokhovskiy A., Morozova N., Yurkov G., et al. // *Molecules*, 2023. V.28(13), P.4945

<https://doi.org/10.3390/molecules28134945>

## Стабильность разнолигандных ацетилацетонатных комплексов: квантово-химическое исследование

*Евсеев Георгий Сергеевич*

*Новосибирский государственный университет, Институт неорганической химии СО РАН*

*Крючкова Наталья Анатольевна*

*[georgosha@gmail.com](mailto:georgosha@gmail.com)*

$\beta$ -Дикетонатные комплексы – популярный класс прекурсоров в процессах химического осаждения из газовой фазы (MOCVD) для получения пленочных покрытий различного состава, в том числе, металлических, оксидных и смешанно-оксидных [1]. Процессы MOCVD требуют контролируемую и воспроизводимую скорость газофазного массопереноса, что также предполагает термическую стабильность в газовой фазе. Зачастую  $\beta$ -дикетонатные комплексы существуют в виде олигомеров, что осложняет контроль состава газовой фазы. Одним из решений этой проблемы является разнолигандное комплексообразование: введение дополнительного лиганда, например, диамина. Другое преимущество данного подхода – возможность подбора свойств варьированием двух наборов лигандов. Однако существует проблема неустойчивости данных комплексов к отщеплению дополнительного лиганда. Существует ряд работ (например, [2]), посвященных проблеме устойчивости разнолигандных комплексов в зависимости от типа  $\beta$ -дикетонатного или дополнительного лиганда, но не хватает исследований стабильности этого класса соединений в зависимости от центрального атома. Таким образом, в данном исследовании рассматривается ряд комплексов 3d-металлов первого переходного ряда (Co, Ni, Cu, Zn), а также магния с ацетилацетонатным лигандом как самым доступным  $\beta$ -дикетонатным лигандом.

Известно, что комплекс  $[\text{Mg}(\text{tmeda})(\text{acac})_2]$  ( $\text{tmeda} = \text{N,N,N',N'}$ -тетраметилэтилендиамин,  $\text{acac} =$  ацетилацетонат) претерпевает разложение на воздухе с отщеплением лиганда  $\text{tmeda}$  [3], тогда как комплекс  $[\text{Cu}(\text{tmeda})(\text{acac})_2]$  в литературе не описан. С целью выяснения причин нестабильности этих комплексов осуществлено сравнение с относительно стабильными комплексами  $[\text{M}(\text{tmeda})(\text{acac})_2]$ ,  $\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}$ . Для этого проведено квантово-химическое исследование по теории функционала плотности (B3LYP), в ходе которого проанализированы геометрия молекул в кристаллической и газовой фазах, молекулярные орбитали, карты электростатических потенциалов, распределение электронной плотности по теории Atoms in Molecules (AIM) и слабые нековалентные взаимодействия (анализ NCI). Рассчитаны термодинамические параметры реакции отщепления электронейтрального лиганда  $\text{tmeda}$  с базисными наборами M6-31G(TM)+ и def2-TZVP. Рассчитаны и сопоставлены с экспериментальными ИК-спектры для ряда комплексов (рис. 1).

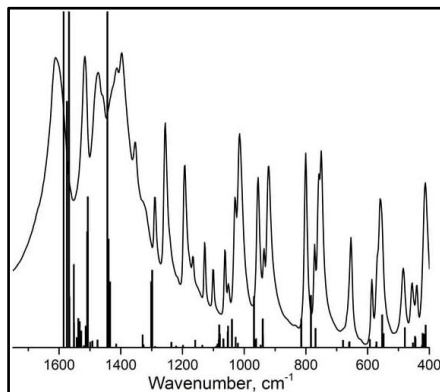


рис.1. Сопоставление экспериментального (линия) и теоретического (столбцы) спектров ИК  $[\text{Ni}(\text{tmeda})(\text{acac})_2]$

Анализ топологии электронной плотности по теории АИМ показал, что для связевых точек Mg-O и Mg-N характерна пониженная электронная плотность и меньшее значение лапласиана электронной плотности, что позволяет предположить пониженную стабильность комплекса  $[Mg(tmeda)(acac)_2]$ .

Из молекулярных графов  $[M(tmeda)(acac)_2]$  видно, что молекулы всех соединений имеют по 6 внутримолекулярных водородных связей  $CH_{3tmeda}...O$ , с дополнительной связью  $C_{\gamma}H_{acac}...O$  для  $M = Mg, Zn$ . Тем не менее, водородные связи комплекса  $M = Mg$  слабее, чем у остальных комплексов, что также указывает на меньшую стабильность этого соединения.

Комплекс магния продемонстрировал уникальную картину чередующихся притягивающих и отталкивающих слабых нековалентных взаимодействий между  $\beta$ -дикетонатным остовом и лигандом, отличающуюся от других комплексов.

Термохимическое моделирование реакции отщепления лиганда tmeda с учетом температурного и энтропийного факторов демонстрирует нестабильность соединений  $[M(tmeda)(acac)_2]$ ,  $M = Mg, Cu$ .

Список публикаций:

- [1] Stienen C. et al. Fluorinated  $\beta$ -diketonate complexes  $M(tfac)_2(TMEDA)$  ( $M = Fe, Ni, Cu, Zn$ ) as precursors for the MOCVD growth of metal and metal oxide thin films // *RSC advances*. – 2022. – Т. 12. – №. 35. – С. 22974-22983.  
[2] Vikulova E. S. et al. Thermal properties of mixed-ligand magnesium complexes with beta-diketonates and diamimes as potential MOCVD precursors // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2014. – Т. 118. – С. 849-856.  
[3] Halz J. H., Heiser C., Merzweiler K. Bis(acetylacetonato- $\kappa^2O, O'$ )( $N, N, N', N'$ -tetramethylethylenediamine- $\kappa^2N, N'$ ) magnesium (II) // *IUCrData*. – 2022. – Т. 7. – №. 11. – С. x221035.

## Изучение фотохимии бипиридилного комплекса рутения(II), перспективного для применения в фотохимиотерапии

Кокоренко Андрей Андреевич

Новосибирский государственный университет

Глебов Евгений Михайлович

[kaa090901@gmail.com](mailto:kaa090901@gmail.com)

Последние десятилетия комплексные соединения активно применяются в области фотокатализа и фотохимиотерапии, в частности соединения платиновых металлов. Один из комплексов рутения, трис-(2,2-дипиридил)рутений(II), является, пожалуй, одним из наиболее изученных в отношении фотохимии комплексов [1]. Исследуемое соединение, похожее на трис-бипиридилный комплекс, -  $[Ru(bpy)_2(NH_3)_2]^{2+}$  - является перспективным для применения в терапии опухолей, поскольку в отличие от координационных соединений платины(II) они проявляют высокую цитотоксичность только при активации светом, эффективно связываясь с ДНК даже при малых концентрациях [2]. Это может значительно повысить терапевтический индекс противораковых препаратов и пролекарств при использовании данного комплекса.

В ходе работы был установлен механизм фотохимического замещения в координационной сфере бипиридилного комплекса рутения(II). Методом стационарного фотолиза установлен конечный продукт фотохимического превращения - комплекс  $[Ru(bpy)_2(H_2O)(OH)]^+$ . Методом лазерного импульсного фотолиза определено, что замещение является последовательным - замена аммиачных лигандов на молекулы воды параллельно с кислотно-основным равновесием во внутренней сфере продукта с образованием  $[Ru(bpy)_2(H_2O)_2]^{2+}$ . Благодаря методу сверхбыстрой кинетической (фемтосекундной) спектроскопии определено протекание предшествующего акватации фотофизического процесса - колебательное охлаждение в термически равновесном триплетно-возбужденном состоянии комплекса ( $^3PЗМЛ$ ) после его образования.

Список публикаций:

- [1] Juris A., Balzani V., Barigelletti F., Campagna S., Belser P., von Zelewsky A. // *Coord. Chem. Rev.* 1988. Vol. 84. P. 85–277.  
[2] Pauly M., Kayser I., Schmitz M., Dicato M., Guerso A. D., Kolber I., Moucheron C., Mesmaeker A. K.-D. // *Chem. Comm.* 2002. Vol. 10. P. 1086–1087.

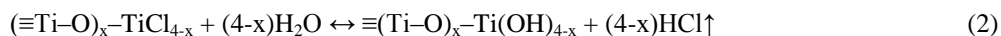
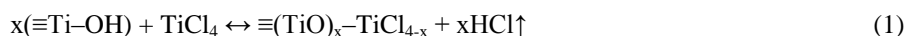
## Физико-химические основы и примеры практического применения технологии молекулярного наслаивания

Лебедев Михаил Сергеевич

Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН

[lebedev@niic.nsc.ru](mailto:lebedev@niic.nsc.ru)

На протяжении многих лет технологии химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) с непрерывной подачей реагентов позволяли успешно решать задачи получения тонкопленочных покрытий самого различного состава, толщины и функционального назначения. Но задача воспроизводимого получения тонких и сверхтонких покрытий высокой степени конформности с прецизионным контролем их толщины и химического состава с определенного момента потребовала развития новых представлений о твердом веществе и химии его поверхности. Метод молекулярного наслаивания (МН) [1,2], который был предложен в начале 60-х годов группой сотрудников Ленинградского технологического института им. Ленсовета (В.И. Алесковский, С.И. Кольцов и др.), и который в зарубежной литературе стало принято называть «метод атомно-слоевого осаждения» (atomic layer deposition, ALD) стал технологией мирового значения [3]. Сутью нового метода явилась реализация на поверхности твердого тела химических реакций между подводимыми газообразными реагентами и функциональными группами подложки в условиях максимального удаления от равновесия. В частности, получение пленок диоксида титана, которое в ходе ХОГФ-процесса может быть представлено в брутто-виде как реакция гидролиза тетрахлорида титана  $\text{TiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 + 4\text{HCl}\uparrow$ , при МН реализуется как серия циклически чередующихся, разделенных во времени, самоограничивающихся поверхностных реакций:



где  $\equiv$  - это подложка.

Каждая реакция (1) и (2) называется полуциклом, а вместе они составляют полный реакционный цикл МН. Рассмотренные реакции являются примером. Кроме галогенидов, могут быть использованы и другие летучие соединения, в первую очередь металлоорганические. В качестве со-реагента для получения оксидных пленок могут использоваться другие источники кислорода ( $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}^*$ -плазма,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.). Для получения пленок нитридов используют аммиак, для сульфидов – сероводород и т.д. Повторение реакций заданное число раз приводит к формированию химически связанного с подложкой слоя высокой степени равномерности и конформности, с отсутствием пустот и относительно малым количеством дефектов. Контроль толщины происходит на молекулярном уровне, т.к. каждый реакционный цикл добавляет строго определенное количество материала на поверхность, называемое постоянной роста. Эта величина составляет, как правило, меньше одного монослоя.

Возможности метода МН и его преимущества по сравнению с другими методами привели с начала XXI в. к большому количеству научно-практических работ, связанных с поиском новых летучих реагентов, способов их синтеза и очистки, разработкой новых процессов и оборудования для их проведения и мониторинга. Исследуются механизмы поверхностных реакций, свойства получаемых покрытий и характеристики сложных наноструктур, изготавливаемых на их основе. Круг тонкопленочных материалов, полученных методом МН, постоянно расширяется. Разрабатываются маршруты, обеспечивающие получение многокомпонентных материалов. Посредством МН был реализован целый ряд практически важных задач микроэлектроники: подзатворный “high-k”-диэлектрик, устройства динамической памяти с произвольным доступом, flash-, резистивная и сегнетоэлектрическая память. Получение тонких и сверхтонких конформных покрытий актуально в задачах микросистемной техники, солнечной энергетики, оптики, катализа, медицины, фармацевтики и др. В данном докладе проводится разбор примеров из литературы и практики автора.

Работа выполняется при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № 121031700314-5

Список публикаций:

[1] Кольцов С.И. // ЖПХ. 1969. Т. 42. № 5. С. 1023-1028

[2] Малыгин А.А. // ЖПХ. 1996. Т. 69. № 10. С. 1585-1593

[3] Piirinen R. // J. Appl. Phys. 2005. V.97. 121301

## Изучение механизма фотодегradации загрязнителя природных вод метронидазола в водных растворах

**Новиков Михаил Владимирович**  
Новосибирский государственный университет,  
Институт химической кинетики и горения СО РАН  
Поздняков Иван Павлович  
[m.novikov@kinetics.nsc.ru](mailto:m.novikov@kinetics.nsc.ru)

Метронидазол (MNZ), входящий в группу антимикробных средств категории "препараты и средства для личной гигиены" (РПСР), применяется для терапии заболеваний человека и животных. В конце двадцатого века, в свете растущего интереса к экологическим исследованиям, MNZ, подобно многим другим фармацевтическим веществам, был обнаружен в сточных и природных водах. Подобно другим РПСР, метронидазол медленно деградирует, требуя новых эффективных методов очистки воды, включая фотохимические стратегии.

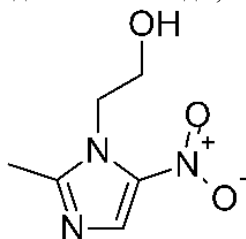


рис. 1. Структурная формула метронидазола.

В настоящей статье представлены последние исследования механизма фотолиза MNZ в водных растворах с pH = 7, осуществляемые при использовании света с длинами волн 254, 282, 308 и 365 нм. Эти данные позволяют оценить поведение данного загрязнителя в условиях современных систем УФ-дезинфекции и под воздействием солнечного света. С использованием методов высокоэффективной жидкостной хроматографии, оптической спектроскопии, квантово-химических расчетов, а также стационарного фотолиза и импульсного лазерного фотолиза были получены следующие результаты:

1. Исследована первичная стадия фотодегradации – фотодиссоциация. Выделены основные интермедиаты, формирующиеся при возбуждении MNZ, включая нитрит-анион и 1-(2-гидроксиэтил)-2-метил-1H-имидазол-5-ильный катион. Определены константы скорости соответствующих реакций.
2. Проведены расчеты квантовых выходов для различных длин волн облучения.

$\lambda_{\text{возб}}$ (нм)	254	282	308	365
Квантовый выход	$1.0 \times 10^{-2}$	$8.3 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$

3. Установлены конечные продукты, включая продукты перегруппировки нитро-фрагмента, окисления алкильного фрагмента, окисления ароматического кольца, гидроксирования и перегруппировки ароматического цикла. На основе этих данных предложен механизм фотодегradации MNZ.

Эти результаты представляют академический интерес в контексте разработки методов очистки воды от устойчивых экотоксикантов, включенных в категорию РПСР.

## Механизм образования синглетного кислорода при фотовозбуждении золотых наночастиц

**Сафин Роман Русланович**  
Новосибирский государственный университет  
Ершов Кирилл Сергеевич, к.ф.-м.н.  
Пыряева Александра Павловна, к.ф.-м.н.  
[safin.roman23@bk.ru](mailto:safin.roman23@bk.ru)

Золотые наночастицы (НЧ) являются одними из самых стабильных металлических НЧ среди прочих и, благодаря наличию у них полосы поглощения поверхностного плазмонного резонанса (ППР), обладают рядом примечательных свойств, что делает их привлекательными для использования в фотокатализе, фототермической терапии и многих других приложениях [1]. Относительно недавно обнаружили, что фотовозбуждение суспензий НЧ золота в полосе ППР может приводить к образованию активных форм кислорода, в частности, супероксид аниона  $O_2^-$  и синглетного кислорода  $^1O_2$  [2]. Поэтому НЧ золота

представляют интерес, как новый класс активных фотосенсибилизаторов с высоким коэффициентом экстинкции в видимой области, фотостабильностью и более низкой цитотоксичностью, чем у органических красителей [2]. Данные преимущества могут позволить развить методы фотодинамической и фототермической терапии [1, 2]. Однако в настоящее время доподлинно неизвестен механизм образования молекул  $^1\text{O}_2$  при фотовозбуждении золотых НЧ в полосе поглощения ППР, поэтому представляется актуальным изучение механизма данного фотопроцесса, что и является целью нашей работы.

В настоящей работе объектом исследования стала водная суспензия золотых НЧ, стабилизированная низко- и высокомолекулярным гиалуронатом натрия (0.1%), аскорбиновой кислотой (0.18%) и гидроксидом натрия (0.07%). В работе использовались: спектрофотометр и оптическая установка, состоявшая из Nd:YAG лазера, монохроматора, ИК-фотодетектора и осциллографа. Помимо этого, написана программа, позволяющая получать распределение размеров НЧ по изображениям, полученным с просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ).

В ходе работы сняты спектры поглощения водных суспензий золотых наночастиц при разных концентрациях. Зарегистрированы сигналы ИК-люминесценции в диапазоне 1200-1400 нм, возникающие при возбуждении суспензий импульсным лазерным излучением с длиной волны 532 нм, и спектр люминесценции в той же области (рис. 1). Исследовано влияние облучения и насыщения кислородом суспензии на спектр поглощения. Построена зависимость сигнала люминесценции от энергии возбуждающего излучения. Подготовлены образцы наночастиц для исследования методом ПЭМ. На основании полученных ПЭМ-изображений, построены гистограммы распределения наночастиц по размерам (рис. 2).

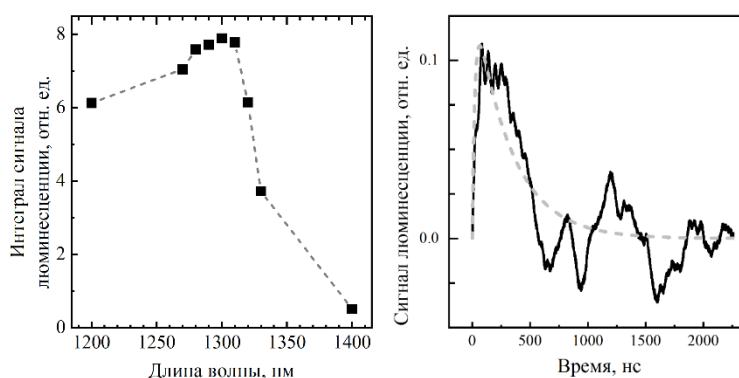


рис.1 Спектр (1а) и сигнал люминесценции (1б) на 1300 нм, зарегистрированные при фотовозбуждении водной суспензии золотых наночастиц на 532 нм (200 мг/л, 40 мДж, усредненные по 2048 импульсам). Пунктирная линия (1б) – аппроксимация сигнала, соответствующая кинетике тушения второго порядка.

На основании проделанной работы получены следующие результаты и сделаны выводы. При фотовозбуждении водной суспензии НЧ золота импульсным лазерным излучением в полосе поглощения ППР зарегистрирована короткоживущая ИК-люминесценция со спектральным максимумом около 1300 нм, отнесенная к люминесценции молекул  $^1\text{O}_2$ . Установлено, что образование молекул  $^1\text{O}_2$  обусловлено трехфотонным процессом, предположительно состоящим из однофотонного возбуждения кислорода до супероксид аниона и последующим двухфотонным отщеплением электрона от аниона в течение одного лазерного импульса. Также установлено, что барботирование суспензии чистым кислородом приводит к увеличению сигнала люминесценции. Кроме того, НЧ после процесса фотовозбуждения уменьшаются в размере.

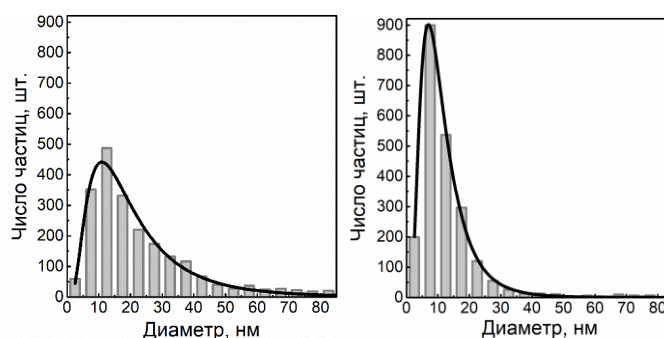


рис.2 Гистограммы распределения по размерам НЧ в исходной (2а) и облученной суспензиях (2б), сплошная линия на гистограмме – аппроксимация логнормальной функцией со средним геометрическим диаметром частиц  $d_0 = 17.6$  нм и стандартным геометрическим отклонением  $\sigma_g = 2$  для исходной суспензии и  $d_0 = 9.9$  нм и  $\sigma_g = 1.8$  для суспензии после облучения.

Список публикаций:

[1] Daniel M. C., Astruc D. *Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology* // *Chem. Rev.* 2004. V. 104. № 1. P. 293-346.

[2] Pasparakis G. *Light-induced generation of singlet oxygen by naked gold nanoparticles and its implications to cancer cell phototherapy* // *Small.* 2013. V. 9. № 24. P. 4130-4134.

## Исследование механизмов фотоиндуцированных процессов для люминесцентных азагелиценов фуорохинолинового ряда

Таможникова Вероника Сергеевна

Новосибирский государственный университет

Глебов Евгений Михайлович, д.ф.-м.н.

[v.tamozhnikova@g.nsu.ru](mailto:v.tamozhnikova@g.nsu.ru)

Фенантрены и их гетероциклические аналоги относятся к числу важнейших азотсодержащих гетероциклических соединений благодаря хорошим оптическим свойствам, включая высокие квантовые выходы люминесценции и чувствительность к среде растворителя. Фотофизические свойства фенантридинового ядра поддаются тонкой настройке путем введения соответствующих заместителей в различные положения фенантридинового каркаса. В отличие от классических производных фенантридина их гетероциклические аналоги, в особенности производные фуорохинолина мало изучены. В работе описаны новые азагелицены фуорохинолинового ряда, синтезированные в группе В.З. Шириняна (ИОХ РАН) и изучены их фотофизические характеристики. Используются методы стационарного фотолиза, наносекундного лазерного импульсного фотолиза и времязрешенной люминесценции.

Были измерены спектральные и кинетические характеристики люминесценции и триплетного возбужденного состояния ряда азагелиценов (рис. 1), обладающих абсолютной фотохимической стабильностью в растворах (за исключением хлорсодержащих растворителей). Протонирование азагелиценов приводит к батохромному сдвигу полос поглощения и люминесценции (рис. 2). Соединение с максимальным батохромным сдвигом может быть рекомендовано для использования в качестве сенсора на кислоты, соединение с максимальным квантовым выходом люминесценции (~ 40% в ацетонитриле) представляется перспективным в качестве лазерной среды.

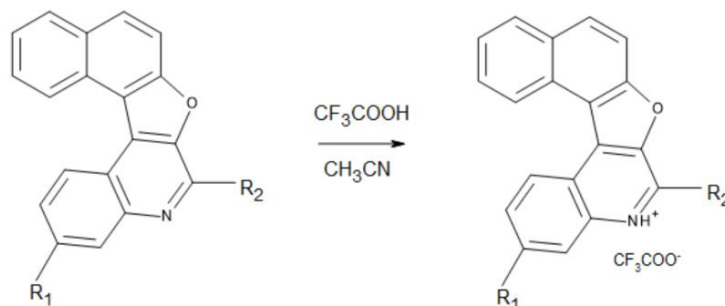


рис.1. Люминесцентные азагелицены.  $R_1 = Br, OMe$ .  $R_2 = MeOPh, Me, Ph, CF_3P$

В экспериментах по лазерному импульсному фотолизу растворов азагелиценов в ацетонитриле зарегистрировано образование триплетного состояния исходных молекул. Зарегистрированы спектры поглощения триплетов, измерены их характеристики (коэффициенты молярного поглощения и квантовые выходы образования). Измерены константы скорости реакций, приводящих к гибели триплетов (тушение растворенным кислородом и Т-Т аннигиляция).

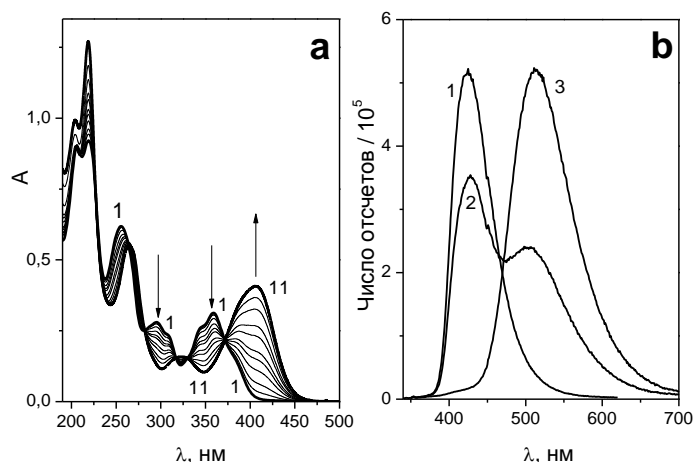
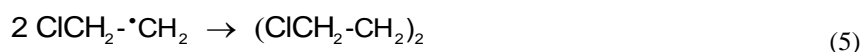
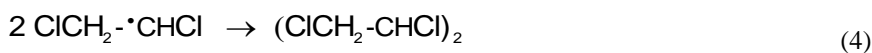
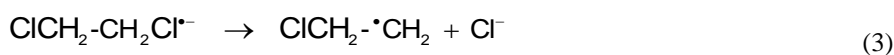


рис.2. Поглощение (а) и люминесценция (b) типичного азагелицена. (а) – изменение электронного спектра поглощения при последовательном добавлении  $CF_3COOH$  в диапазоне 0 (кривая 1) ÷  $6.2 \times 10^{-3}$  М (кривая 11). (b) – спектры люминесценции при разных концентрациях кислоты 0,  $4.95 \times 10^{-4}$  и  $9.3 \times 10^{-3}$  М для кривых 1-3 соответственно).

В хлорсодержащих растворителях (хлороформ, 1,2-дихлорэтан) обнаружена фотохимическая реакция образования протонированной формы. Первичным фотопроцессом является перенос электрона с возбужденной молекулы азагелицена на растворитель. Предложен механизм фотолиза (реакции 1-5 для случая 1,2-дихлорэтана;  $HeI$  – азагелицен).



Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-13-00226).

Список публикаций:

[1] V. S. Tamozhnikova, V. V. Semionova, V. P. Grivin, E. M. Glebov, R. Yu. Balakhonov, I. S. Mekeda, V. Z. Shirinian // *High Energy Chemistry*. 2023. Vol. 57, Suppl. 3, p. S473.

## Влияние персульфата калия на минерализацию гербицида 2,4-DB под действием УФ облучения

Тютерева Юлия Евгеньевна

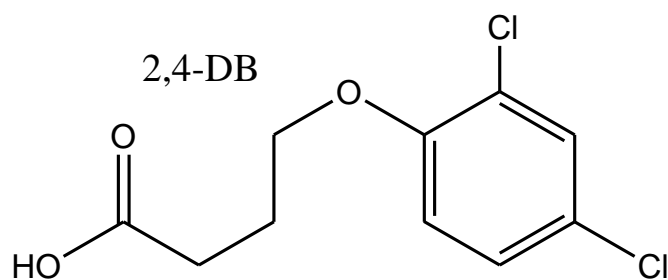
Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН

Поздняков Иван Павлович

E-mail Y57z@mail.ru

2,4-DB (рис. 1) является аналогом популярного органического гербицида 2,4-D, который применяется в сельском хозяйстве для борьбы со многими однолетними и многолетними широколистными сорняками. Эти гербициды обладают химической стабильностью и устойчивостью к биодegradации, благодаря чему они относятся к наиболее распространенным загрязнителям поверхностных вод. Известно, что фотохимические реакции под действием солнечного света играют важную роль в процессах трансформации и degradation гербицидов в окружающей среде. Кроме того, УФ облучение используется для генерации активных окислительных радикалов, способных осуществлять очистку и обеззараживание сточных вод.





4-(2,4-dichlorophenoxy)butyric acid

рис.1. Структурная формула исследуемого вещества

В работе определена эффективность фотохимического разложения и минерализации 2,4-DB в отсутствии и присутствии персульфата калия (PS) методом стационарного (эксимерная лампа XeCl, 282 и 308 нм) фотолиза в сочетании с ВЭЖХ и анализом содержания органического углерода (ТОС). PS рассматривается в качестве перспективной фотоактивной добавки в водоочистке, так как при его возбуждении УФ светом происходит генерация окислительных  $SO_4^{\cdot-}$  радикалов.

Показано, что при облучении на 282 и 308 нм в отсутствие персульфата деградация целевого соединения низкая (примерно 51 и 21%), при этом минерализация образцов отсутствует. Добавление PS (1 мМ) приводит к полной деградации загрязнителя (29 мкМ) за два часа облучения при облучении как на 282 нм, так и на 308 нм. Однако, 100% минерализация достигается только при облучении на 282 нм, что связано со значительным падением как эффективности поглощения света, так и квантового выхода фотолиза PS. Результаты работы важны для понимания эффективности фотолиза и минерализации 2,4-DB и подобных ему гербицидов под действием УФ облучения в процессах водоочистки с применением фотоактивных добавок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-23-00097).

### Исследование механизма фотолиза сукцинатного комплекса железа(III) в водном растворе

Цай Иван Евгеньевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет

Поздняков Иван Павлович<sup>1</sup>, к.х.н.

[i.tsai@g.nsu.ru](mailto:i.tsai@g.nsu.ru)

Комплексы железа (III) с поликарбоновыми кислотами активно изучаются в качестве фотоактивных реагентов для генерации активных форм кислорода в процессах глубокого окисления загрязняющих органических веществ. Главные рабочие характеристики таких систем – устойчивость комплекса и квантовый выход фотолиза (который прямо влияет на выход активных форм кислорода). Кроме того, для фундаментальных и практических исследований важно подробное изучение механизмов реакций, происходящих в фотосистемах на основе карбоксилатных комплексов железа.

Целью данной работы является описание фотолиза комплекса железа с яблочной кислотой состава 1:2 ( $[Fe(suc)_2]$ ). Механизм фотолиза сукцинатного комплекса железа (III) на воздухе был предложен в работе [1] и является общепринятым на данный момент, однако различия в протекании фотолиза в инертной и кислородсодержащей атмосфере ранее не были описаны.

При проведении экспериментов по фотолизу данного комплекса в кислородсодержащей и инертной атмосфере было замечено нестандартное поведение: практически одинаковая скорость фоторазложения в начале облучения, затем следует резкое ускорение (~ в 3.7 раз) в атмосфере аргона и отсутствие каких-либо существенных изменений в скорости фотолиза на воздухе:

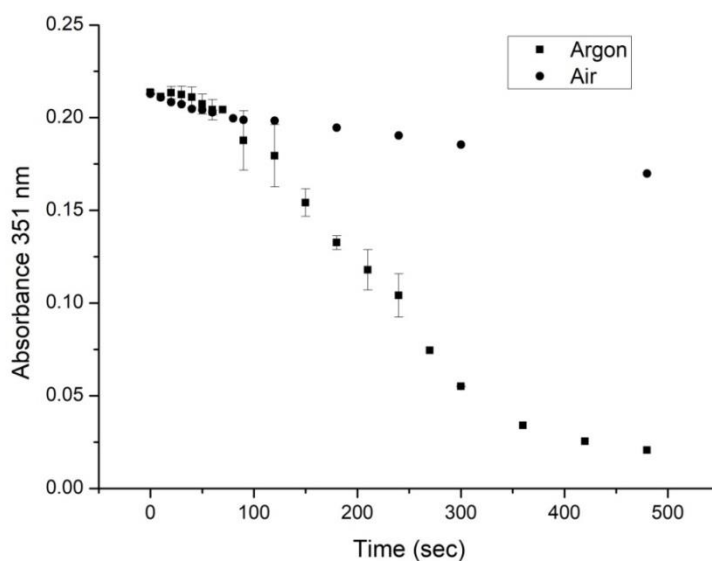


рис. 1. Сравнительный график фоторазложения комплекса  $[Fe(suc)_2]$  в растворах с нормальным содержанием кислорода и насыщенных аргоном.

Показано отсутствие протекания термических реакций в системе облученной в атмосфере аргона; также после фотолиза в аргоне темновая регенерация при доступе воздуха практически не наблюдается, в то время как после фотолиза на воздухе за то же время регенерирует почти треть фотовосстановившегося железа.

Результаты работы, полученные с применением стационарного фотолиза, методов спектрофотометрии и хромато-масс-спектрометрии:

- Измерены и сравнены квантовые выходы фотолиза комплекса  $[Fe(suc)_2]$  в атмосферах аргона и воздуха;
- На основании конечного состава продуктов предложен механизм фотолиза в обоих случаях; механизм фотолиза на воздухе сравнен с предложенным в литературе ранее.

Итогом работы является впервые описанный механизм фотолиза сукцинатного комплекса Fe(III) в инертной атмосфере и сравнение его с механизмом фотолиза на воздухе, что является важным для дальнейшего изучения фотохимии карбоксилатных комплексов железа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 23-23-00097).

Список публикаций:

[1] Weller C. et al. Photolysis of Fe (III) carboxylato complexes: Fe (II) quantum yields and reaction mechanisms. //Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. – 2013. – V. 268. – P. 24-36.

## Зависимость реакционного радиуса диффузионно-контролируемой реакции захвата заряда на полимерную цепь от величины валентного угла

Четвериков Артём Олегович

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского

Боровков Всеволод Игоревич

[a.chetverikov@gsu.ru](mailto:a.chetverikov@gsu.ru)

Широко используемым подходом к изучению ионизированных состояний молекул полимеров в растворах является метод импульсного радиолитического анализа [1]. В подобных исследованиях очень важным является вопрос о кинетике образования исследуемых состояний. Такая кинетика, в свою очередь, определяется тем, насколько быстро образованные в облученном растворителе первичные носители заряда, например, сольватированные электроны, захватываются на молекулы полимера. В рамках предшествующих теоретических исследований были получены приближенные соотношения для эффективного радиуса подобной

диффузионно-контролируемой реакции только для случаев, когда полимерная цепь представляется либо как линейная цепь, либо как гауссов клубок. В данной работе проводится обобщение на случай произвольного валентного угла между соседними сегментами полимерной цепи.

Полимер рассматривается как упорядоченный набор  $N$  сфер, на границах которых происходит контактная реакция. Соответствующее диффузионное уравнение решается в так называемом монополюсном приближении [2] и посредством преобразования Лапласа. Для константы скорости удаётся получить аналитическое выражение, и в рамках рассматриваемой модели удалось определить зависимость реакционного радиуса диффузионно-контролируемой реакции от величины валентного угла. В предельном случае, когда угол стремится к  $\pi/2$ , зависимость соответствует той, что известна для гауссова клубка. В пределе малого отклонения от линейной цепочки получена простая формула, определяющая поправку для реакционного радиуса. Все полученные результаты проверены с помощью стохастического моделирования и согласуются с ним. Посредством моделирования так же рассмотрено влияние молекулярно-массового распределения полимера на кинетику реакции.

Список публикаций:

[1] Sreearunothai P. et al. Length and time-dependent rates in diffusion-controlled reactions with conjugated polymers //The Journal of Physical Chemistry A. – 2009. – Т. 113. – №. 12. – С. 2786-2795

[2] Traytak S. D. The diffusive interaction in diffusion-limited reactions: the time-dependent case //Chemical physics. – 1995. – Т. 193. – №. 3. – С. 351-366

## Строение и биологические свойства комплексов меди(II) на основе $\beta$ -аминовинилкетонов с $N$ -нафтил и $N$ -хинолил заместителями

*Ширяева Анастасия Андреевна*

*Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики*

*Власенко Валерий Григорьевич, д.ф.-м.н.*

*[anastasia.shiryeva00@mail.ru](mailto:anastasia.shiryeva00@mail.ru)*

Азотсодержащие гетероциклы повсеместно встречаются в различных природных соединениях, фармацевтических препаратах, агрохимикатах, так как обладают, во многих случаях, ярко выраженной биологической активностью. В течение последних нескольких десятилетий эти соединения привлекли значительное внимание научного сообщества как со стороны разработки эффективных методов синтеза этих соединений, так и их практического применения. В настоящей работе приведены результаты исследования структуры и биологических свойств комплексов меди(II) на основе  $\beta$ -аминовинилкетонов с  $N$ -нафтил и  $N$ -хинолил заместителями. Кетоиминатные комплексы меди(II) **7-10** были получены в результате взаимодействия соответствующих  $\beta$ -аминовинилкетонов **3-6** и моногидрата ацетата меди в метаноле (схема).

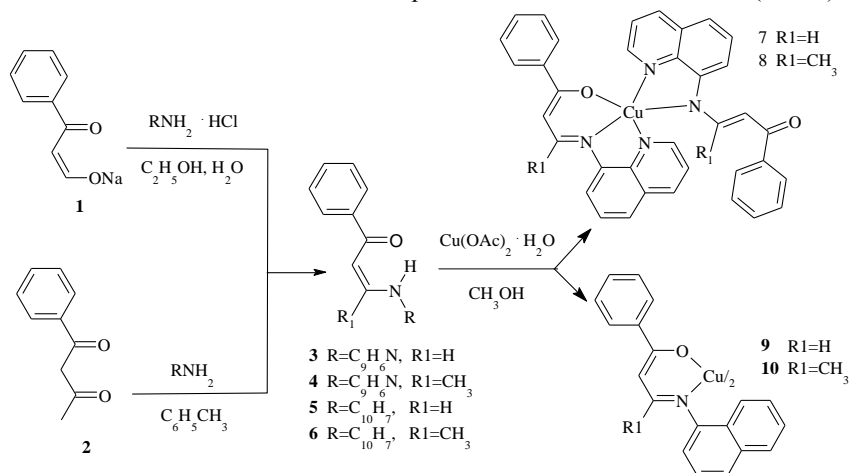


схема. Синтез комплексов меди(II) **7-10**.

Методами ИК, ЭПР, электронной спектроскопии поглощения, магнетохимии, рентгеновской спектроскопии поглощения, РСА и квантово-химических расчетов изучено строение, физико-химические свойства препаративно выделенных соединений **3-10**. Измеренные магнитные моменты этих соединений находятся в интервале 1.8-2.0 М.Б., что свидетельствует о моноядерном строении комплексов **7-10** и присутствии иона меди в состоянии  $d^9$ ,  $S = 1/2$ . На основе анализа XANES и EXAFS К-краев меди установлены параметры локального атомного строения комплексов меди(II) **7-10**. Найдено, что в случае комплексов меди(II)

**9, 10** с лигандами с N-нафтил заместителями реализуется искаженное плоско-квадратное окружение координационного центра, тогда как в случае хинолил-заместителей для комплексов **7,8** координационное число ближайшего окружения ионов меди увеличивается до 5, указывая на дополнительную координацию атома азота хинолина одного из лигандов. Подтверждение такого вывода о реализации пентакоординированного иона меди следует из данных рентгеновской дифракции комплекса **7** (рис.).

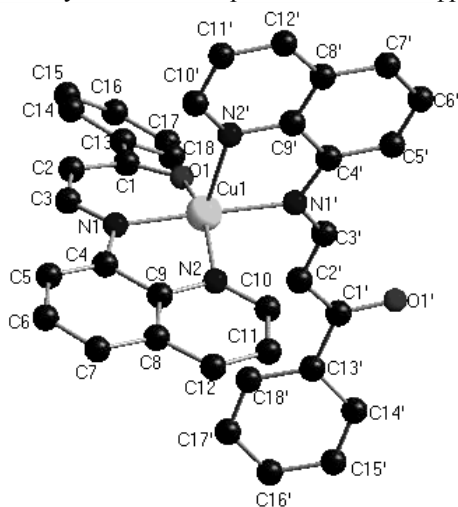


рис. Молекулярная структура комплекса **7**

Согласно результатам РСА в соединении **7** к иону меди координированы тридентатно и бидентатно два лиганда. Причем один из них связан с металлом атомами азота азометиновой связи, хинолинового фрагмента и кислорода, а вторая только атомами азота. В результате в молекуле **7** формируется сильно искаженный квадратно пирамидальный координационный полиэдр. Основание пирамиды образуют три атома азота (два азометиновой связи N(1), N(1'), один хинолинового заместителя N(2)) и атом кислорода O(1) одного из лигандов. В вершине пирамиды на расстоянии 2.216 Å находится атом азота N(2') хинолинового заместителя.

В электронных спектрах поглощения комплексов **7, 8** наблюдается одна широкая полоса около 400-451 нм и малоинтенсивное поглощение в интервале 680-770 нм, причем в случае соединения **8** первая из них смещена в коротковолновую область на ~50-70 нм. На основе расчетов TD-DFT приближении B3LYP/6-31G(d) установлено, что полоса при 400-451 нм связана с внутрелигандными переходами переноса заряда, также как и для β-аминовинилкетонов **3-6**. Малоинтенсивное поглощение при 680-770 нм отнесено к d-d переходам, что характерно для квадратно-пирамидальных комплексов. В спектрах **9, 10** присутствуют две полосы в районе 300-360 нм и широкое диффузное малоинтенсивное плечо около 600 нм. Полосы при 300-360 нм, были отнесены, как и в случае металлохелатов **7, 8**, к внутрелигандным переходам с переносом заряда.

Полученные аминокислотные производные β-дикетонов **3-6** и комплексы меди(II) **7-10** были исследовали на антибактериальную, фунгистатическую и протистоцидную активности. Обнаружено, что соединения **4** и **8** обладают значительной протистоцидной активностью в отношении инфузорий вида *Colpoda steinii*. Активность соединения **4** превышала в два раза активность препарата сравнения хлорохина и в 8 раз – толтразурила. Протистоцидные свойства **8** незначительно уступают активности хлорохина и в 2 раза превышает активность толтразурила. Результаты определения антибактериальной активности показали, что соединения **4, 9** и **10** оказывали некоторое ингибирующее действие в отношении грамположительных бактерий *Staphylococcus aureus*. Соединения **3, 4, 7, 8** подавляли рост грамотрицательных бактерий *Escherichia coli*. Фунгистатическая активность выявлена только у соединения **4** и составляла 22 % активности препарата сравнения фундазола. Из полученных результатов следует, что несмотря на близкое строение хинолинсодержащих β-аминовинилкетонов **3,4** и их комплексов **7,8** достаточно высокой протистоцидной активностью обладают только соединения, содержащие в молекулах метильный заместитель R1. Все N-нафтилзамещенные производные проявили слабую биологическую активность в проведенных исследованиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности, проект №FENW-2023-0014).



## **10 - Астрофизика, физика космоса, современные и перспективные космические исследования и технологии**

Голубовский Максим Петрович, магистрант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет  
**Моделирование поглощения инфракрасного триплета атома кислорода в атмосфере экзопланеты KELT-9b**

Шайхисламов Ильдар Фаритович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [maxym9121@gmail.com](mailto:maxym9121@gmail.com) стр. 194

Назаров Сергей Валентинович, н.с.  
Научный, Крымская астрофизическая обсерватория  
**Восстановление и модернизация телескопа «Синтез»**  
e-mail: [astrotourist@gmail.com](mailto:astrotourist@gmail.com) стр. 196

Шепелин Артем Витальевич, аспирант 3 года обучения  
Новосибирск, Институт лазерной физики, лазерной физики  
**Моделирование кинетики элементов в частично ионизованной плазме экзопланетных атмосфер**  
Шайхисламов Илдар Фаритович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [4.shepelin@gmail.com](mailto:4.shepelin@gmail.com) стр. 197

# Моделирование поглощения инфракрасного триплета атома кислорода в атмосфере экзопланеты KELT-9b

*Голубовский Максим Петрович*

*Шепелин Артём Витальевич, Шайхисламов Ильдар Фаритович*

*Новосибирский государственный технический университет*

*Шайхисламов Ильдар Фаритович, д.ф.-м.н.*

*[maxym9121@gmail.com](mailto:maxym9121@gmail.com)*

Наблюдения космическими и наземными телескопами спектральных линий элементов при транзитах экзопланет дают уникальную информацию. Для правильной интерпретации данных измерений, понимания протекающих процессов и состава атмосфер экзопланет принципиально важным является моделирование поглощения линий. Особенно интересным представляется моделирование поглощения в линиях тяжёлых элементов, например, кислорода или азота, потому что заметное наблюдаемое поглощение может указывать на то, что атмосфера экзопланет является вторичной, а вторичные атмосферы характерны для планет, которые при выполнении некоторых иных условий могут быть пригодными для жизни. Относительно недавно было обнаружено поглощение в триплетной линии атома кислорода с длиной волны 777,4 нм [1]. Оно было обнаружено в атмосфере сверхгорячего Юпитера KELT-9b.

KELT-9b обладает уникальными параметрами – массивная (с массой 2,88 масс Юпитера) и сверх-горячая (при температуре 4000 К является самой горячей из обнаруженных экзопланет). Планета обращается на близком расстоянии 0.0336 А.Е. от молодой и горячей звезды, которая излучает экстремальные потоки в ВУФ и УФ области спектра. Также данная планета вращается на малом расстоянии от своей родительской звезды — малая полуось равна приблизительно 0.0336 А.Е. При таких параметрах планета очевидно не обладает вторичной атмосферой, однако исследование KELT-9b необходимо для создания и апробации методов диагностики и анализа с использованием линии кислорода, поскольку в будущих наблюдениях данный триплет будет обнаружен в атмосферах и других экзопланет.

Моделирование в данной работе может быть разделено на три этапа. На первом этапе определяется пространственная структура и состав атмосферы. Вторым этапом является вычисление населённости нижнего уровня триплета, переходы с которого образуют поглощение в линии. Для этого была разработана кинетическая модель атома кислорода. На третьем этапе вычисляется поглощение в линии 777,4 нм. Для первого этапа решения проблемы используется трёхмерная магнитогидродинамическая модель атмосфер горячих экзопланет [2]. Для сравнения, в [1] использовалась одномерная модель, которая не может продемонстрировать некоторые явления и процессы. Наша модель учитывает большое число процессов, а также в ней возможно включение различных тяжёлых элементов, например, кислорода, углерода, магния. Эта модель ранее успешно применялась для моделирования горячих экзопланет, но не включала кинетику уровней элементов. Корректное моделирование кислорода в данной работе является первым шагом для модернизации модели и возможности моделирования вторичных атмосфер. Таким образом, используя результаты 3D моделирования в виде пространственных распределений температуры, концентрации атомов кислорода в основном состоянии, концентрации электронов, населённости основного состояния одиножды ионизованного атома кислорода, мы вычисляем на втором этапе населённости нижнего уровня триплета, что представлено на рисунке 1.

Применяемая здесь кинетическая модель – это двухуровневая схема, которая включает в себя основное состояние атома кислорода и нижний уровень триплета. Учитываются такие процессы как фотоионизация, фотовозбуждение, радиационный распад, переходы за счёт столкновения с электронами, а также рекомбинация. Также учитывается поглощение фотовозбуждающих фотонов при распространении сквозь атмосферу экзопланеты. Данный процесс является важнейшим, потому что фотовозбуждение оказывается основным процессом накачки нижнего уровня триплета. Также для сравнения выполнен расчёт населённости нижнего уровня триплета в предположении локального термодинамического равновесия. Это позволяет оценить, насколько важен учёт всех процессов.

На последнем этапе вычисляется непосредственное поглощение в линии и сравнение с наблюдениями. Под поглощением в астрофизике экзопланет подразумевается относительная разность излучения в момент первичного транзита и в момент, когда планета не проходит по диску звезды. В данной работе используется Фойгтовский профиль линии с эмпирической аппроксимацией [3]. Сечение поглощения задавалось с помощью формулы (1). Поглощения, полученные в предположении ЛТР и при кинетическом расчете, изображены на рисунке 2. Полученный результат сопоставим с результатами из работы [1], но учтено большее число пространственных эффектов.

$$\sigma(x) = f_{12} \frac{\sqrt{\pi} e^2}{m_e c \Delta \nu_D} H(\alpha, x) \quad (1)$$

$$\Delta \nu_D = \sqrt{\frac{2kT}{m_i c^2}} \nu_0 \quad (2)$$

где  $f_{12}$  – сила осциллятора перехода,  $\Delta \nu_D$  – доплеровская ширина линии (2),  $m_i$  – масса атома кислорода,  $H(\alpha, x)$  – функция Фойгта, для которой используется приближение из [3]

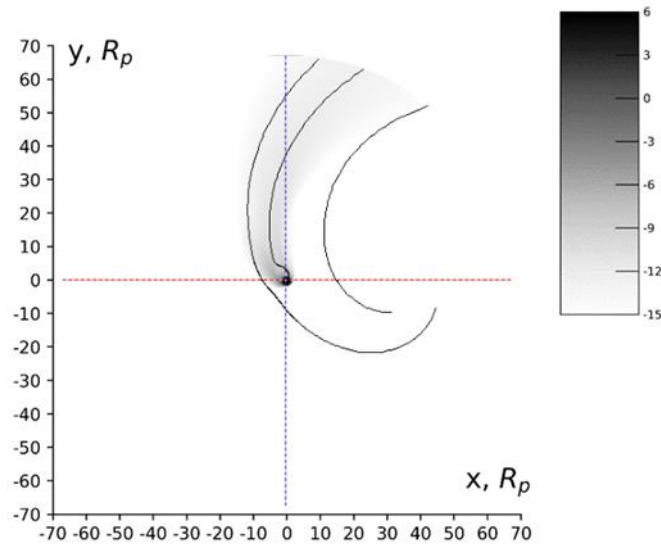


рис. 1. Распределение населённости нижнего уровня триплета атома кислорода, истекающего из планетарной атмосферы, в масштабе звездной системы. Цвет характеризует населённость и значение показывает десятичный логарифм. Чёрные линии демонстрируют типичные линии тока протонов, включая звездный ветер.

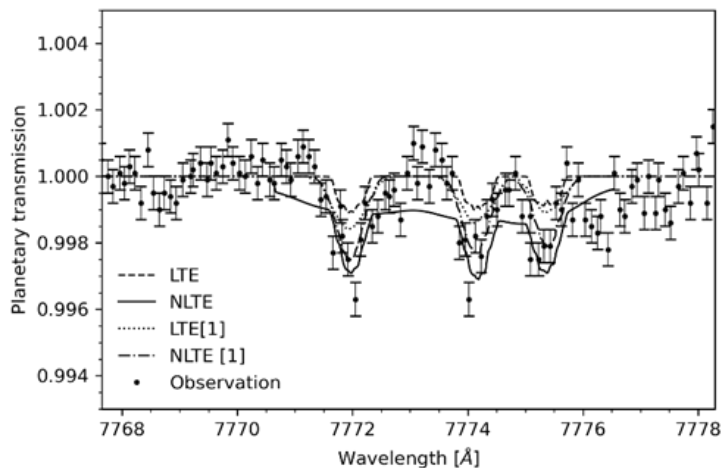


рис.2. Контуры поглощения, полученные в предположении ЛТР, не-ЛТР, а также результаты из [1] и данные наблюдений.

Список публикаций:

- [1] Borsa F. et al. // *Astrophys. J.* 2018. 866, 47
- [2] Shaikhislamov, I.F. et al. // *Astrophys. J.* 2018. 866, 47
- [3] Tasitsiomi A // *Astrophys. J.* 2006. 645, 792.



**Модернизация телескопа «Синтез» в КРАО РАН**  
**Назаров Сергей Валентинович**  
*Крымская астрофизическая обсерватория РАН*  
*[astrotourist@gmail.com](mailto:astrotourist@gmail.com)*

В 1978-м году в Крымской астрофизической обсерватории введён в строй экспериментальный телескоп «Синтез» или «АСТ-1200». [1] Он установлен в павильоне с откатной крышей, на экваториальной монтировке вилочного типа. Оптика выполнена по кассегреновской схеме с тонким ситалловым сегментированным главным зеркалом, которое состоит из шести одинаковых подвижных шестиугольных сегментов и одного центрального неподвижного диаметрами по 40см. [2]

После развала Советского Союза телескоп около тридцати лет находился на консервации. Электронные системы управления монтировкой и двигателями зеркал устарели морально и физически. Стоимость современных устройств точного позиционирования сегментов превышает наши финансовые возможности, а поставка затруднена в связи с санкциями. Опыт собственного производства подобной техники отсутствует. Кроме того, исследование оптических свойств сегментов показало недостаточное качество.

Модернизация телескопа началась в 2018 году с расчёта новой оптики для главной апертуры и создания современной системы управления монтировкой. К 2021 году реализован ряд технических и программных решений, позволивших приступить к научным исследованиям на базе временного 350 мм телескопа, установленного на главной трубе «Синтеза».

Монтировка приводится в движение двумя идентичными приводами, состоящими из трех электродвигателей и двух сельсина-датчиков положения, грубого и точного. Команды двигателям отдают два модуля управления приводами, которыми, в свою очередь, управляет одноплатный миникомпьютер Raspberry Pi. Специальный регулятор, разработанный из-за большого момента инерции монтировки, во время движения телескопа рассчитывает тормозной путь и начинает контролируемое торможение когда конечная точка оказывается близко к точке назначения.

Общее управление крышей, телескопом и периферией осуществляет промышленный контроллер Овен ПЛК-100. Связь с Raspberry Pi и ПЛК-100 идёт по протоколу Modbus. [3]

Первой научной задачей стали астрометрические наблюдения спутников Урана и Нептуна совместно с ГАО РАН, в 2020-21 годах. Съёмка велась на камеру QHY-9: размер пикселя 5.4 мкм, масштаб 630 mas/pix, рабочее поле 35×26 угловых минут. Типичное время накопления 45 секунд. Проницание составило 19 m, астрометрические ошибки 50 mas.

В 2022 году приёмная часть 350 мм телескопа оснащена корректором, новой камерой QHY600M и колесом с фотометрическими фильтрами g, r, i, z системы Sloan. К 2023 году в круг наблюдательных задач добавлены активные ядра галактик, малые тела Солнечной системы, послесвечения гамма-всплесков, вспышки сверхновых, переменные звёзды и звёзды с экзопланетными транзитами. Благодаря разработке нового программного обеспечения для обработки кадров организован систематический поиск астероидов Главного пояса, а также сближающихся с Землёй.

Начинается изготовление оптической системы для главной апертуры – цельного зеркала диаметром 1000 мм. Приёмник будет расположен в прямом фокусе, после корректора. Расчётное линейное поле зрения 60×60 мм. Фокусное расстояние 3200 мм.

За шесть лет модернизации телескопа создана оригинальная система управления всем комплексом аппаратуры, установлен временный телескоп, начаты систематические научные наблюдения по ряду научных направлений, обнаружены 400 неизвестных астероидов, среди которых один троянец Юпитера и один околоземный. Один принадлежит к семейству Амог, один к Hungaria, остальные относятся к главному поясу. Самый быстрый носит временное обозначение 2022 YU10, и на момент открытия обладал скоростью 85.3 "/час

Список публикаций:

- [1] *Ustinov N. D., Vasilev A. S., Vysotskii Iu. P. et al. AST-1200 astronomical telescope having a sectional main mirror // Optiko Mekhanicheskaia Promyshlennost. — 1985. — Vol. 52. — P. 22–25.*
- [2] *Basov N. G., Dimov N. A., Gvozdev M. I. et al. New Astronomical Telescope AST-1200 with a Segmented Actively Controlled Primary Mirror // The MMT and the Future of GroundBased Astronomy. — 1979. — Vol. 385. — P. 185*
- [3] *Харченко, А. В., Назаров С. В. Система управления телескопа «Синтез» // Астрономия и исследование космического пространства / Издательство Уральского университета, 2022. — С. 185-188. — EDN DZGINP.*

## Моделирование кинетики элементов в частично ионизированной плазме экзопланетных атмосфер

*Шепелин Артем Витальевич*

*Институт лазерной физики СО РАН*

*Шайхисламов Илдар Фаритович, д.ф.-м.н.*

*[4.shepelin@gmail.com](mailto:4.shepelin@gmail.com)*

Первые открытия экзопланет в конце 1980-х значительно раздвинули рамки наших знаний о строении Вселенной и подтвердили одну из наиболее смелых гипотез. Это послужило толчком к появлению новых методов наблюдения и развитию компьютерных технологий моделирования. Сегодня наблюдения телескопами и изучение экзопланет неразрывно связано с компьютерным моделированием атмосфер, так как чаще всего мы располагаем данными именно о верхних слоях их газовых оболочек. Одно из основных направлений исследований в данной области связано с определением химического состава. Данная задача довольно сложна, поскольку многие спектральные линии поглощения значительно ослабляются при прохождении межзвёздной среды и подвергаются зашумлению в атмосфере Земли. Эта особенность ограничивает возможность определения наличия и содержания элементов в атмосферах. Однако, с помощью компьютерного моделирования, привлекающего наиболее современные физические теории, существует возможность максимально полного и точного использования спектральной информации. Условно, процесс моделирования делится на два этапа: моделирование движения и распределения вещества (магнитная гидродинамика, МГД), моделирование населенностей энергетических уровней элементов. Первый этап дает информацию об основных параметрах — температуре, скоростях элементов, плотности электронов и химических элементов. Второй этап учитывает радиационные и столкновительные процессы, позволяя синтезировать спектр поглощения, который в свою очередь сравнивается с результатами наблюдений.

Для определения распределения вещества используются гидростатические и гидродинамические модели. В ИЛФ СО РАН разработан трехмерный МГД код, позволяющий учитывать сложные процессы взаимного влияния звезды и планеты [1]. Населенности уровней элементов можно моделировать, используя различные приближения. Наиболее простым является приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР), при котором распределения скоростей и спектры считаются равновесными (распределение Максвелла и закон Планка, соответственно). В таком случае, населенности уровней распределены согласно статистике Больцмана, а элементы находятся в ионизационном равновесии, описываемом формулой Саха. В общем случае, такие условия не выполняются, а в ряде случаев (например, для близкоорбитальных планет) отличаются принципиально. Другим подходом, позволяющим учесть более сложные распределения рассматриваемых величин, является детальное моделирование кинетики радиационных и столкновительных переходов (НЛТР).

В данной работе представлена новая универсальная программная библиотека для моделирования кинетики квантовых переходов в космической плазме. Она доступна в двух версиях: на языках C++ и Python. Библиотека учитывает как равновесное приближение, так и неравновесную кинетику. Неравновесная кинетика описывается с помощью “основного уравнения”, которое позволяет учесть ударные и радиационные процессы, включая возбуждение, девозбуждение, ионизацию и рекомбинацию. Немаловажным аспектом библиотеки является адаптация наиболее полных моделей элементов (C I-III, Mg I-III, O I-II, Fe I-III — энергии, силы осциллятора, сечения связанно-свободных переходов, эффективные силы столкновений для более чем 700 квантовых уровней) [2]. На примере аномально горячей экзопланеты KELT-9 b рассмотрено влияние примесных элементов на термодинамику атмосферы, что позволяет объяснить формирование поглощения в спектральной линии 777.4 нм кислорода, впервые обнаруженного в газовой оболочке планеты, находящейся вне Солнечной системы.

Список публикаций:

[1] Шайхисламов И. Ф., Ходаченко М. Л., Березуцкий А. Г // *Астрономический журнал*. 2021. Т. 98. № 1. С. 10-28.

[2] Mashonkina L. I., Simova T. N., Pakhomov Yu. V // *Astronomy Letters*. 2016. V. 42. P. 606-615.



## 11 - Биофизика, медицинская физика

- Акинина Мария Дмитриевна, аспирант 3 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физический факультет  
**Проведение численных экспериментов по прохождению стимулирующих электрических импульсов через ткани отолитовой мембраны на высоких и низких**  
Владимир Петрович Демкин, д.ф.-м.н.  
e-mail: [maakin1993@yandex.ru](mailto:maakin1993@yandex.ru) стр. 201
- Грабовой Алексей Сергеевич, 4 курс  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологий  
**Использование бактериального и ферментативного люминесцентных биотестов для характеристики радиопротекторных свойств фуллеренола C60,70**  
Кудряшева Надежда Степановна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [lexxx1595@gmail.com](mailto:lexxx1595@gmail.com) стр. 202
- Демкин Олег Владимирович, аспирант 1 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, физический факультет  
**Реологические характеристики крови в нарушении вестибулярной функции**  
Удут Владимир Васильевич, д.м.н., член-корреспондент РАН  
e-mail: [demkinoleg81@gmail.com](mailto:demkinoleg81@gmail.com) стр. 203
- Жуйков Данил Андреевич, 4 курс  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, институт фундаментальной биологии и биотехнологий  
**Изучение состава газа, выделяющегося в процессе «мокрого» сжигания органических отходов в перексиде водорода с использованием электрического тока**  
Трифонов Сергей Викторович, к.б.н.  
e-mail: [zdani1748@gmail.com](mailto:zdani1748@gmail.com) стр. 205
- Кунина Елизавета Игоревна, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, естественных наук  
**Структура ДНК-дуплекса с неправильной СУ-парой оснований**  
Шернюков Андрей Владимирович, к.х.н.  
e-mail: [liza.kunina.00@gmail.com](mailto:liza.kunina.00@gmail.com) стр. 206
- Мещерякова Валерия Анатольевна, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Диродиновый комплекс как перспективное лекарство в фотохимиотерапии**  
Глебов Евгений Михайлович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [v.meshcheryakova@g.nsu.ru](mailto:v.meshcheryakova@g.nsu.ru) стр. 207
- Мирошниченко Сергей Александрович, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Разработка модели обонятельной луковицы крысы с использованием методов биологоподобного моделирования для исследования биоэлектрической активности, вызванной предъявлением одорантов**  
Шапошников Дмитрий Григорьевич, к.т.н.  
e-mail: [sermir@sfedu.ru](mailto:sermir@sfedu.ru) стр. 208
- Назаров Алексей Дмитриевич, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Применение композита ПДМС/УНТ в качестве сухого электрода регистрации биоэлектрической активности**  
Шапошников Дмитрий Григорьевич, к.т.н.  
e-mail: [anazar@sfedu.ru](mailto:anazar@sfedu.ru) стр. 209
- Орехова Светлана Михайловна, 4 курс  
Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, физико-технический факультет  
**Изучение влияния магнитного поля на структурообразование в биологически совместимой эмульсии**  
Закинян Артур Робертович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [smorekhova@mail.ru](mailto:smorekhova@mail.ru) стр. 210

Орехова Светлана Михайловна, 4 курс  
Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет, физико-технический факультет  
**Исследование влияния магнитного поля различных конфигураций на всхожесть семян**  
Закирян Артур Робертович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [smorekhova@mail.ru](mailto:smorekhova@mail.ru) стр. 211

Савинов Данил Сергеевич, магистрант 2 года обучения  
Иркутск, Иркутский государственный университет, физический факультет  
**Электретные свойства и биоэнергетика структур органического происхождения**  
Максимова Наталья Тимофеевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [dankatawer@gmail.com](mailto:dankatawer@gmail.com) стр. 212

Семенова Александра Алексеевна, 5 курс  
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Инженерная школа ядерных технологий  
**Воздействие нитрата тория на интенсивность биолюминесценции двух сопряженных реакций, катализируемых бактериальными ферментами**  
Сачкова Анна Сергеевна, к.б.н.  
e-mail: [a.smnv296@gmail.com](mailto:a.smnv296@gmail.com) стр. 213

## Проведение численных экспериментов по прохождению стимулирующих электрических импульсов через ткани отолитовой мембраны на высоких и низких частотах

Акинина Мария Дмитриевна<sup>1</sup>

Мельничук Сергей Васильевич<sup>1</sup>, Смаглий Людмила Вячеславовна<sup>1,2,3</sup>, Светлик Михаил Васильевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Сибирский государственный медицинский университет,

<sup>3</sup>Северский биофизический научный центр

Демкин Владимир Петрович, д.ф.-м.н.

[maakin1993@yandex.ru](mailto:maakin1993@yandex.ru)

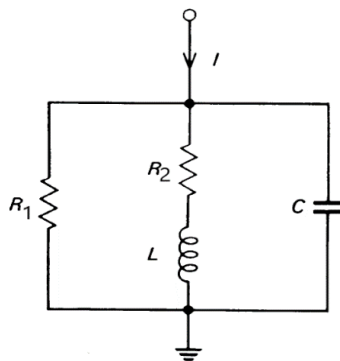
Ключевую роль в механизме механоэлектрической трансдукции у позвоночных играют волосковые клетки, которые находятся во всех периферических структурах, отвечающих за слух и равновесие. Сенсорные сигналы вестибулярных рецепторов являются механическими по своей природе. Пучок стереоцилий отвечает за преобразование механических входных сигналов в электрический сигнал посредством процесса, называемого механотрансдукцией [1]. Когда стереоцилии отклоняются в сторону самых высоких стереоцилий, напряжение в концевых соединениях увеличивается и передается на комплекс механотрансдукционных каналов для закрытия канала.

Для исследования спектральной чувствительности волосковых клеток разработана физико-математическая модель распространения электрического гармонического сигнала через ткани отолитовой системы. Электрофизическая модель замещения отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного (крысы), представлялась в виде совокупности проводящих и диэлектрических областей на основе анатомической структуры, определенной из МРТ/КТ-снимков. Эквивалентная электрическая схема замещения отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного (крысы), представлялась аналогично работе [2] на основе измеренных удельных электрофизических характеристик тканей отолитовых структур, с учетом изменяющейся ионной проводимости и колебательного характера рецепторного потенциала волосковых клеток. Актуальность частотного анализа реакции отолитовых структур на внешний электрический стимул обусловлена наличием в их функционировании двух главных физиологических механизмов: внешнего механизма, в котором внешний стимул фильтруется до трансдукции волосковой клетки, внутренний, в котором фильтрация присуща самой волосковой клетке.

Многочисленные исследования слуховых и вестибулярных сенсорных рецепторов, волосковых клеток, показали, что в дополнение к тому, что они отвечают за механоэлектрическую трансдукцию, они также могут играть решающую роль в частотной избирательности слухового органа.

Ключом к пониманию источника частотной избирательности у низших позвоночных стало наблюдение, что при подаче прямоугольного импульса тока потенциал мембраны волосковых клеток на фронтах импульса не ослабевал экспоненциально, а совершал серию затухающих синусоидальных колебаний, причем, частота колебаний в данной клетке совпадала с частотой, к которой клетка была наиболее чувствительна к акустическим стимулам [3].

Исходя из концепции резонансного отклика волосковой клетки на электрический импульс, электрическую схему замещения волосковой клетки можно представить в следующем виде [4]:



$R_2$  – сопротивление цитоплазмы;  $L$  – феноменологическая индуктивность клетки;  $C$  – емкость мембраны клетки;  $R_1$  – сопротивление межклеточной ткани.

рис. 1. Электрическая модель волосковой клетки

Нами разработана физико-математическая модель распространения электрического гармонического сигнала через ткани отолитовой системы. Электрофизическая модель замещения отолитовых органов вестибулярного аппарата лабораторного животного (крысы), представлена в виде совокупности проводящих и диэлектрических областей на основе анатомической структуры, определенной из МРТ/КТ-снимков.

Проведен расчет электрического импеданса клеточных элементов утрикулы и саккулы и сдвига фаз протекающего тока по отношению к внешнему электрическому стимулу на основании геометрических данных и электрофизических параметров отолитовых органов лабораторного животного (крысы) в интервале частот 0–5000 Гц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-25-00259, <https://rscf.ru/project/23-25-00259>.

Список публикаций:

[1] Straka H., Zwergal A., Cullen K.E. Vestibular animal models: contributions to understanding physiology and disease // *J Neurol*, 2016. – Vol. 263. – Suppl 1. – pp. 10–23. Doi: 10.1007/s00415-015-7909-y.

[2] Demkin V.P., Melnichuk S.V., Svetlik M.V., Shchetinin P.P., Kingma H., Van de Berg R., Demkin O.V., Udut E.V. Experimental Investigation of Electric Signal Transmission Through Vestibular Organ Tissues // *Russian Physics Journal*, 2019. – Vol. 61. – Issue 12. – pp. 2264–2267. Doi: 10.1007/s11182-019-01665-4.

[3] Fettiplace R., Fuchs P.A. Mechanisms of hair cell tuning // *Annu. Rev. Physiol*, 1999. – Vol. 61. – pp.809–34.

[4] Edwin R. Lewis Tuning in The Bullfrog Ear // *Biophys. J*, 1988. – Vol. 53. – 441–447.

## **Использование бактериального и ферментативного люминесцентных биотестов для характеристики радиопротекторных свойств фуллеренола C<sub>60,70</sub>**

*Грабовой Алексей Сергеевич*

*Колесник Ольга Владиславовна*

*Сибирский федеральный университет*

*Кудряшева Надежда Степановна*

*[lexxx1595@gmail.com](mailto:lexxx1595@gmail.com)*

Радиопротекторы - это вещества, которые смягчают воздействие радионуклидов на биологические системы. В данной работе рассматривается фуллеренол C<sub>60,70</sub>O<sub>y</sub>(OH)<sub>x</sub>, (где x=22-24, y=2-4) в качестве потенциального радиопротекторного агента. Фуллеренолы представляют собой наноразмерные полигидроксилорированные водорастворимые производные фуллеренов, которые показали свою радиопротекторную эффективность в других исследованиях [1-3].

Биолюминесцентный биотест, основанный на морских люминесцентных бактериях, является удобной системой для скрининга радиопротекторной активности различных веществ. В последние десятилетия активно используется люминесцентный ферментативный биотест на основе бактериальных ферментов. Биолюминесцентные методы обеспечивают высокую достоверность статистической обработки результатов благодаря относительной дешевизне и высокой скорости проведения анализа с использованием современных люминометров [4].

Целью данной работы было выявление радиопротекторной активности фуллеренола в растворах модельного радионуклида трития с использованием биолюминесцентного бактериального биотеста.

Для мониторинга интенсивности биолюминесценции бактерий в присутствии трития и фуллеренола применяли люминесцентные морские бактерии *Photobacterium Phoshoreum*. Для выявления роли ферментативных процессов использовали биолюминесцентную биферментную систему NADPH+FMN-оксидоредуктаза — люцифераза. Для мониторинга содержания активных форм кислорода (АФК) в биолюминесцентных системах использовали хемолюминесцентный люминольный метод.

В результате проведения экспериментов была выявлена активация биолюминесценции тритием (см. рис.1, кривая 1), что подтверждает результаты, полученные в предыдущих исследованиях [5]. Показано, что в присутствии фуллеренола (см. рис.1, кривая 2) наблюдалось смещение кинетической кривой ближе к контролю, что показывает снижение эффектов трития, то есть радиопротекторную активность фуллеренола.

Наблюдали умеренное снижение АФК (20%-30%) в бактериальной среде в присутствии трития. Добавление фуллеренола не изменяло достоверно содержание АФК. Вероятно данный эффект объясняется способностью бактерий балансировать содержание АФК в окружающей среде. Не обнаружено изменение интенсивности биолюминесценции и содержания АФК в ферментативной системе в присутствии фуллеренола.

Выявление роли ферментативных процессов в радиопротекторных свойствах фуллеренола требует дальнейшего изучения.

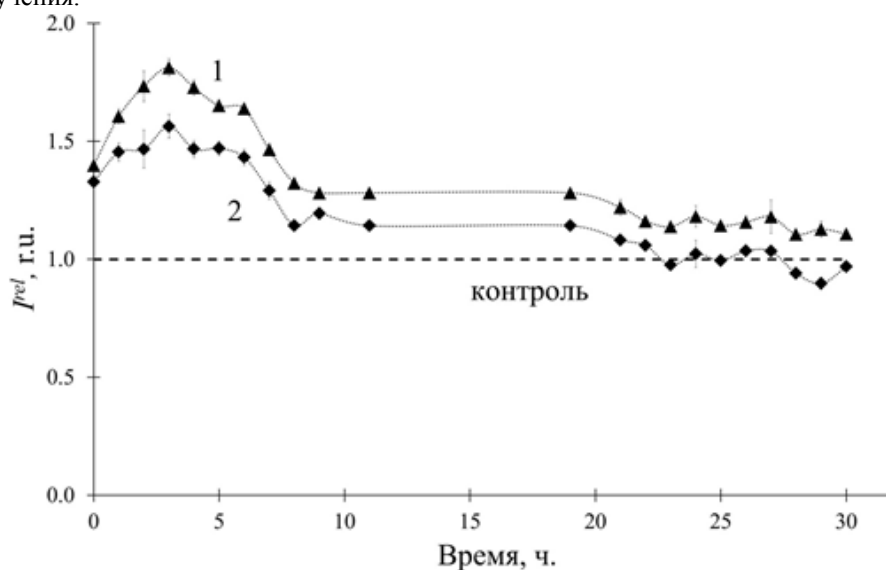


рис. 1. Кинетика бактериальной биолюминесценции в отсутствие (1) и присутствии (2) фуллеренола. Удельная радиоактивность НТО – 500 МБк/л. Концентрация фуллеренола – 10-11 г/л

Таким образом, проведенные исследования показали, что фуллеренол  $C_{60},70O_y(OH)_x$ , (где  $x=22-24$ ,  $y=2-4$ ) имеет радиопротекторные свойства: смягчение эффекта трития достигало 30-40%. Данный эффект мы связываем с интенсификацией физиологических функций бактерий, включая биолюминесценцию и производство АФК бактериями.

Список публикаций:

- [1] Kudryasheva N. S., Tarasova A. S. Pollutant toxicity and detoxification by humic substances: mechanisms and quantitative assessment via luminescent biomonitoring // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. Т. 22. № 1. С. 155–167.
- [2] Zeman E. M. *The Biological Basis of Radiation Oncology* // *Clinical Radiation Oncology*. : Elsevier, 2016. Т. 4. С. 2–40.
- [3] On mechanism of antioxidant effect of fullereneols / A. S. Sachkova, E. S. Kovel, G. N. Churilov [u др.] // *Biochem. Biophys. Reports.* 2017. Т. 9. № August 2016. С. 1–8.
- [4] Nemtseva E. V, Kudryasheva N. S. The mechanism of electronic excitation in the bacterial bioluminescent reaction // *Russ. Chem. Rev.* 2007. Т. 76. № 1. С. 91–100.
- [5] Reactive Oxygen Species and low-dose effects of tritium on bacterial cells / T. V. Rozhko, E. I. Nogovitsyna, G. A. Badun [u др.] // *J. Environ. Radioact.* 2019. Т. 208–209. № March. С. 106035.

## Реологические характеристики крови в нарушении вестибулярной функции

Демкин Олег Владимирович<sup>1</sup>

Смаглий Людмила Вячеславовна<sup>1,2</sup>, Руденко Татьяна Владимировна<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

<sup>2</sup>Сибирский государственный медицинский университет

Удуг Владимир Васильевич, д.м.н.

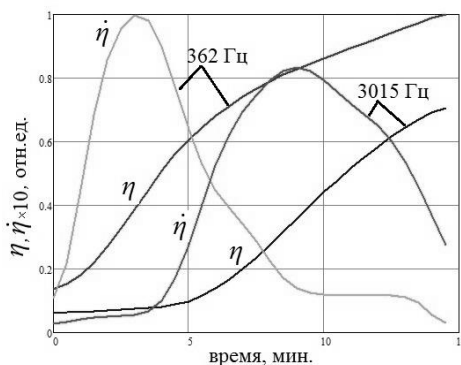
[demkinoleg81@gmail.com](mailto:demkinoleg81@gmail.com)

Причиной наиболее частых форм головокружения выступают ишемические повреждения ткани внутреннего уха, вестибулярных ядер и их проводящих путей [1,2]. К основным механизмам формирования недостаточности кровообращения в регионе вестибулярной системы относят артериальную гипертензию, нарушения системы гемостаза и атеросклеротические повреждения сосудов лабиринта, где атеросклерозу отводится ведущая роль в гипоксии рецепторов лабиринта [3]. Провоцирующей составляющей патогенеза ишемических повреждений вестибулярного аппарата является архитектура регионарного сосудистого русла и костные ограничения его дилатационных реакций, что определяет высокую вероятность патогенности сдвиговых напряжений при подъемах артериального давления в отношении эндотелиальной выстилки вплоть до снижения противосвертывающего потенциала крови. И в этой ситуации, задолго до атеросклеротических повреждений сосудов лабиринта, нарушения гемодинамики происходят последовательно за счёт повышения адгезивной и агрегационной активности тромбоцитов и эритроцитов, снижения скорости кровотока, увеличения гематокрита и концентрации фибриногена, повышения вязкости крови и плазмы [4].



В этой связи, для прогноза формирования ишемических вестибулопатий, особую значимость приобретает совокупная оценка состояния системы гемостаза и реологических характеристик крови, инструментом которой может явиться резонансно-акустический метод технологии низкочастотной пьезотромбоэластографии (НПТЭГ) [5]. Действительно, для цельной крови, динамическая вязкость  $\eta(\dot{\gamma})$  является нелинейной функцией скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  и зависит от: - концентрации и пространственного распределения форменных элементов крови и их агрегационной активности; - состава плазмы; - кинетических характеристик кровотока; - скорости упругих деформаций сдвига и др. Таким образом, вязкость цельной крови — это интегральный показатель, зависящий от множества параметров, определяющих ее макро- и микрореологические свойства, среди которых наибольшее значение имеют четыре фактора: - гематокрит, - вязкость плазмы, - агрегация и деформируемость эритроцитов, вклад которых в вязкость крови зависит от  $\dot{\gamma}$ . Известно, что вязкость крови повышается при низких скоростях сдвига благодаря повышению агрегационной способности форменных элементов крови, обусловленной высоким уровнем плазменных белков [6]. Следовательно, отношение коэффициентов вязкости при низких и высоких скоростях сдвига  $\varepsilon = \frac{\eta(\dot{\gamma} < 100 \text{ c}^{-1})}{\eta(\dot{\gamma} > 100 \text{ c}^{-1})}$  может служить индикатором вклада агрегационных свойств элементов крови в ее вязкость.

В работе на основе резонансно-акустического метода с применением технологии (НПТЭГ) проведено исследование процесса свертывания цельной крови при высоких и низких скоростях сдвиговых деформаций. Процесс свертывания крови сопровождается каскадом биохимических реакций: от наработки тромбина до образования фибринового сгустка. На *рис. 1* приведена зависимость от времени коэффициента вязкости крови, определяющего концентрацию фибрина, и его первой производной ( $\dot{\eta}$ ), определяющей наработку тромбина [7], в условиях периодических сдвиговых напряжений на резонансных частотах 362 Гц и 3015 Гц, соответствующих скоростям сдвиговых деформаций  $70 \text{ c}^{-1}$  и  $250 \text{ c}^{-1}$ .



*рис. 1. Динамика коэффициента вязкости крови и ее первой производной для частот сдвиговых напряжений 362 и 3015 Гц*

Сравнительный анализ зависимостей коэффициентов  $\eta(t)$  и  $\dot{\eta}(t)$  подтверждает, что форменные и плазменные компоненты крови вносят различный вклад в формирование ее вязкоупругих свойств на разных этапах фибриногенеза. Отношение коэффициентов вязкости  $\varepsilon$  показывает, что на начальных фазах свертывания крови преобладает вклад ее плазменных компонент. В областях кровообращения с высокой скоростью сдвига вязкость крови в основном определяется гематокритом и деформируемостью эритроцитов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-25-00259, <https://rscf.ru/project/23-25-00259/>

#### Список публикаций:

- [1] Путилина М.В. // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2012. Т. 112(6):35-39.
- [2] Шеремет А.С. // Consilium Medicum. Отоларингология. 2001.Т. 4: 15—19.
- [3] Н.Л. Кунельская, Е.В. Байбакова, А.Л. Гусева и др. // Вестник оториноларингологии. 2020, — Т. 85, — №3, — С. 32-35. doi.org/10.17116/otorino20208503132.
- [4] Kowal P., Marcinkowska-Gapińska A. // J. Neurol. Sci. 2007. —V. 258, —№ 1–2. —P. 132–136.
- [6] Демкин В.П., Мельничук С.В., Гавар А.В., Демкин О.В. и др. // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. — 2020. — Т. 169, — № 2. — С. 260–264.
- [5] Шаманаев А. Ю., Алиев О. И., Анищенко А. М. и др. Российский кардиологический журнал 2016, 4 (132): 97–102
- [7] Демкин О.В. // Материалы 60-й Международной научной студенческой конференции 10–20 апреля 2022 г. МНСК-2022. Физика. Новосибирск, 2022. —С.148-149.

# Изучение состава газа, выделяющегося в процессе «мокрого» сжигания органических отходов в перексиде водорода с использованием электрического тока

Жуйков Данил Андреевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

<sup>2</sup>Институт биофизики СО РАН

Трифонов Сергей Викторович<sup>1,2</sup>, к.б.н.

[zdani1748@gmail.com](mailto:zdani1748@gmail.com)

Физико-химические методы утилизации отходов органической природы имеют целый ряд преимуществ перед биологическими методами, одни из которых, это малое время переработки продуктов обмена, а также простота регулирования процесса. Метод Куденко – «мокрое» сжигание в перекиси водорода под действием переменного электрического тока – позволяет избавиться от необходимости использования повышенной температуры и давления [1]. Эти факты обуславливают преимущество данного способа перед такими физико-химическими методами как суперкритическое водное окисление и процесс Зимпро [2,3]. Возможность эффективного использования продуктов минерализации метаболитов человека методом Куденко представлены в многолетних исследованиях [4]. Получаемый в итоге газ и минерализованный раствор не оказывают токсического действия на растения и могут быть вовлечены в круговоротные массообменные процессы [5].

Процесс минерализации экзометаболитов методом «мокрого» сжигания протекает до полного распада молекул пероксида водорода. Окисление экзометаболитов человека длится около 3 ч. Длительность данного процесса можно обусловить тем, что в растворе находятся, или могут образовываться при минерализации соединения, которые оказывают стабилизирующее действие на молекулы пероксида водорода, или могут ингибировать активные формы кислорода, образующиеся при распаде перекиси под действием переменного электрического тока. Определение состава газа поможет в изучении разветвления цепей реакций окисления и в поиске способа сокращения времени процесса, что необходимо для его управления с целью получения определенных продуктов.

Понимание научных основ такого управления необходимо для повышения экологичности ряда производств, установления массообменных процессов в искусственных замкнутых экосистемах и для понимания механизмов работы окислительных и антиоксидантных систем живых организмов, которые могут оказывать существенное влияние на степень замкнутости такой системы.

Целью работы было определение состава газа, выделяющегося в ходе химической реакции взаимодействия перекиси водорода и метаболитов человека при различных параметрах активирующего переменного электрического тока.

Объектом исследования служил раствор экзометаболитов человека и пероксида водорода. Были проведены сжигания данных растворов с различными параметрами частоты и формы электрического тока, а именно: а) 50 Гц., синусоида; б) 35 Гц., меандр – и оценен состав выделяющегося газа.

Для осуществления процесса минерализации два типа метаболитов человека (плотные и жидкие отходы) смешивали друг с другом в соотношении, согласно данным [6]: 1г. плотных отходов на 10 мл. урины. К полученной массе добавляли пероксид водорода (36-37%) в соотношении: 4 мл. на 1 г. плотных отходов, 0,5 мл. на 1 мл. урины. Далее через полученную смесь пропускали электрический ток с изменяемым в процессе напряжением. Данный процесс можно разделить на три стадии: 1) Стадия разгона, при напряжении в электрической цепи равном 150 вольт. 2) Рабочая стадия с напряжением 70 вольт. 3) Стадия дожига при напряжении 100 вольт. Параметры частоты и формы электрического тока подобраны в соответствии с данными [7].

В результате проведения сжиганий экзометаболитов человека при разной частоте и форме тока был выявлен состав выделяющегося газа, а также установлено, что принципиальные различия в составе данного газа при разном способе сжигания отсутствуют.

Газ	50 Гц., синусоида, % об. д.	35 Гц., меандр, % об. д.	Атмосфера, % об. д.
O <sub>2</sub>	68,100 ± 1	67,80 ± 1	22,4 ± 1
CO <sub>2</sub>	22,100 ± 0,1	24,50 ± 0,1	0
CO	0,196 ± 0,015	0,157 ± 0,015	0
NO	0,001 ± 0,004	0,001 ± 0,004	0,001 * 10 <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub> S	0,003	0,004	0,002 * 10 <sup>-1</sup>
NO <sub>2</sub>	0,002 * 10 <sup>-1</sup>	0,002 * 10 <sup>-1</sup>	0

Таким образом, в ходе проделанной работы установлен состав газа, выделяющийся в процессе химической реакции взаимодействия  $H_2O_2$  и экзометаболитов человека. Также было установлено, что частота и форма электрического тока существенно не влияет на состав, выделяющегося газа.

Список публикаций:

- [1] Kudenko Yu.A. *Physical-chemical treatment of wastes: a way to close turnover of elements in LSS* / Yu.A. Kudenko, I.A. Gribovskaya, I.G. Zolotukhin // *Acta Astronautica*. 2000. Vol. 46. P. 585 – 589.
- [2] Upadhye R. S., Wignarajah K., Wydeven T. // *Environ. Int.* 1993. Vol. 19 (4). P. 381-392.
- [3] Tsuga S., Tako Y., Endo M., Nishidate K., Fukuda S. // *Proc. of the Int. Symp. on Application of a Closed Experimental System to Modeling of  $^{14}C$  Transfer in the Environment*. Rokkasho, Aomori, Japan, 2007. pp. 119-126.
- [4] Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Manukovsky N. S. Lisovsky G. M., Kudenko Y. A., Kovalev V. S., Gribovskaya I. V., Tirrannen L. S., Zolotukhin I. G., Gros J. B., Lasseur Ch. // *Acta Astronautica*. 2003. Vol. 53. P. 249-257.
- [5] Tikhomirov A., Kudenko Yu., Trifonov S., Ushakova S. // *Adv. Space Res.* 2012. Vol. 49. P. 249-253.
- [6] С. В. Трифонов, Ю. А. Куденко, А. А. Тихомиров, В. В. Клевец Перспективы использования "мокрого" сжигания органических отходов в пероксиде водорода для замкнутых систем жизнеобеспечения. // *Химия в интересах устойчивого развития*. . №22. 2014. С. 203-208.
- [7] Морозов Е. А. и др. Исследование влияния частоты и формы тока в растворе на распад  $H_2O_2$  при минерализации органических отходов в замкнутых системах жизнеобеспечения // *Сибирский аэрокосмический журнал*. – 2014. – №. 1 (53). – С. 164-168.

## Структура ДНК-дуплекса с неправильной CU-парой оснований

Кунина Елизавета Игоревна

Новосибирский государственный университет

Шернюков Андрей Владимирович, к.х.н.

[liza.kunina00@gmail.com](mailto:liza.kunina00@gmail.com)

В молекулах ДНК постоянно образуются повреждения. Например, в человеческой клетке их количество может достигать нескольких тысяч в день на клетку [1]. К повреждениям ДНК относят любые изменения её химической структуры, например разрыв цепи, наличие неправильного основания в паре либо его (т. н. АП-сайт). Однако в клетке существуют системы репарации. Изучение процессов, моделирующих репарацию ДНК, является актуальной задачей, так как повреждения ДНК являются причинами многих заболеваний. Структуры дуплексных ДНК, содержащих АП-сайты, могут быть полезны для разработки противоопухолевых и других лекарственных препаратов [2].

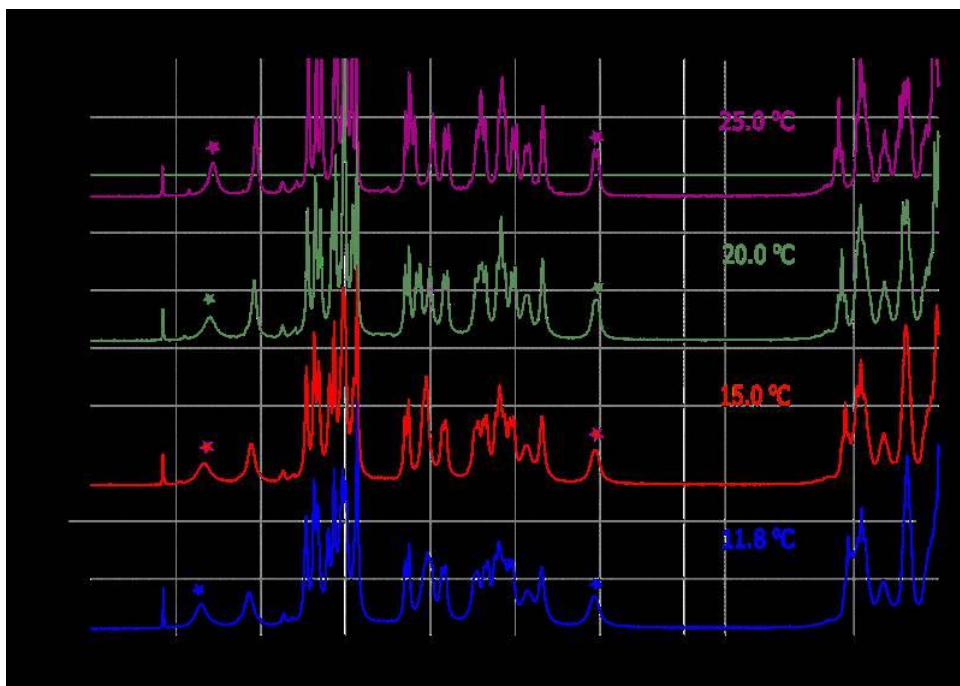


рис.1. Фрагмент спектра ЯМР,  $^1H$  (600МГц,  $D_2O$ ), зарегистрированный при разных температурах

В этой работе мы исследуем структуру ДНК дуплекса, содержащего повреждение в виде неправильной CU-пары. Модель выбрана в качестве референсной для последующего отнесения сигналов и установления

пространственной структуры дуплекса, с аналогичной последовательностью, но содержащего метоксиаминовый АП-сайт вместо уридина. Структура последнего вызывает интерес, поскольку такое повреждение ДНК, индуцируется потенциальным противоопухолевым агентом метоксиамином, который в настоящее время проходит клинические испытания.

В работе были исследованы спектры ЯМР дуплекса в системе H<sub>2</sub>O+D<sub>2</sub>O. Из температурной зависимости спектров следует, что пары С-Г, находящиеся между концевыми парами и парами АТ, являются достаточно прочными. Это свидетельствует об образовании достаточно стабильных спиралей В-типа в этих фрагментах. Часть сигналов особенно СU и близлежащих пар сужаются при повышении температуры, что свидетельствует о наличии быстрого обмена между структурами, за счет процесса, протекающего в центральном фрагменте, который содержит неправильную пару СU.

Список публикаций:

- [1] Helbock HJ, Beckman KB, Shigenaga MK, Walter PB, Woodall AA, Yeo HC, Ames BN. (1998) DNA oxidation matters: the HPLC-electrochemical detection assay of 8-oxo-deoxyguanosine and 8-oxo-guanine. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 95(1): 288–293.  
[2] Kozarich, J. W., Worth, L., Jr., Frank, B. L., Christner, D. F., Vanderwall, D. E., and Stubbe, J. (1989) *Science* 245, 1396–1399.

## Диродиевый комплекс как перспективное лекарство в фотохимиотерапии

*Мещерякова Валерия Анатольевна*

*Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск*

*Новосибирский государственный университет*

*Глебов Евгений Михайлович*

*[v.meshcheryakova@g.nsu.ru](mailto:v.meshcheryakova@g.nsu.ru)*

Химиотерапия является одним из самых популярных способов лечения раковых заболеваний. Широко используемые лекарства в химиотерапии обладают несколькими значимыми недостатками, такими как низкая избирательность к опухолевым клеткам и небольшим терапевтическим индексом, что приводит к ряду побочных эффектов. По этой причине перспективен другой метод лечения раковых опухолей, который позволяет разрушать поврежденные клетки непосредственно в пораженных тканях. Фотодинамическая терапия (ФДТ) основана на применении фотосенсибилизаторов, чувствительных к свету веществ, которые накапливаются в опухолевых тканях и под действием внешнего света вследствие фотохимических превращений разрушают раковые клетки. Механизм действия ФДТ включает реакции с реактивными формами кислорода. Многие опухолевые ткани являются гипоксичными, поэтому интересны методы, не включающие кислородозависимые реакции. Фотохимиотерапия (ФХТ) предполагает лечение раковых клеток по кислород-независимому механизму.

Исследования комплексов платиновых металлов показало, что в ходе фотохимической реакции образуются соединения, по механизму действия схожие с цисплатином [1]. Интересными для изучения являются диродиевые комплексы Rh(II,II)-полипиридил, которые обладают двойным светоиндуцированным цитотоксическим действием - как зависимым от кислорода, так и независимым от него. Данные комплексы показали способность проявлять антираковые свойства и потенциально являются ингибиторами транскрипции ДНК [2].

В работе исследованы фотофизика и фотохимия лиганда dppn (бензо[і]дипиридо[3,2-а:2',3'-h]феназин) и диродиевого комплекса [Rh<sub>2</sub>(μ-O<sub>2</sub>CCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(dppn)<sub>2</sub>](O<sub>2</sub>CCH<sub>3</sub>). Измерены и получены фотофизические характеристики растворов dppn в ацетонитриле. Для водных растворов комплекса показано, что первичной фотореакцией является обмен ацетатного лиганда на молекулу воды.

Список публикаций:

- [1] Bednarski P.J., Mackay F.S., Sadler P.J. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*. 2007. Vol. 7. 75–93 p.  
[2] Knoll J.D., Turro C. *Control and utilization of ruthenium and rhodium metal complex excited states for photoactivated cancer therapy // Coordination Chemistry Reviews*. Elsevier, 2015. Vol. 282–283. P. 110–126.

**Разработка модели обонятельной луковицы крысы с использованием методов биологоподобного моделирования для исследования биоэлектрической активности, вызванной предъявлением одорантов**

*Мирошниченко Сергей Александрович*

*Южный федеральный университет*

*Шапошников Дмитрий Григорьевич, к.т.н.*

*[sermir@sfedu.ru](mailto:sermir@sfedu.ru)*

Для решения задачи распознавания одорантов при сверхнизких концентрациях применяются биогибридные системы. Такие системы сочетают использование биологических структур живого организма и компьютерной обработки данных при помощи машинного обучения. В случае запахов, такой биологической структурой выступает обонятельная луковица крысы. Обоняние у крыс способно распознать одоранты во вдыхаемом воздухе даже при низких концентрациях. При этом большое внимание уделяется обонятельной луковице: активность ее нейронов позволяет распознавать запахи. Все вышеперечисленное побуждает к исследованиям биоэлектрической активности обонятельной луковицы крысы. Существует возможность моделирования этой активности с использованием математических уравнений.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели обонятельной луковицы, способной отражать основные биоэлектрические процессы. Для достижения этой цели использовалась модель Ходжкина-Хаксли, описывающая генерацию и распространение потенциалов действия в нейронах. Модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений (1).

$$\dot{V} = -\frac{1}{C_m}(\sum_i I_i) \quad (1)$$

где  $\dot{V}$  – производная по времени от мембранного потенциала,  $C_m$  – емкость мембраны,  $I_i$  – электрический ток, соответствующий отдельному виду ионных каналов.

Модель учитывает митральные и внешние пучковые клетки, а также получение входного сигнала как напрямую митральными клетками, так и опосредованно через пучковые клетки.

В результате была получена многонейронная модель, описывающая биоэлектрическую активность нейронов обонятельной луковицы крысы (рис. 1). На вход подавалась гармоническая функция.

Полученная активность качественно совпадает с представлениями об электрической активности нейронов обонятельной луковицы крысы.

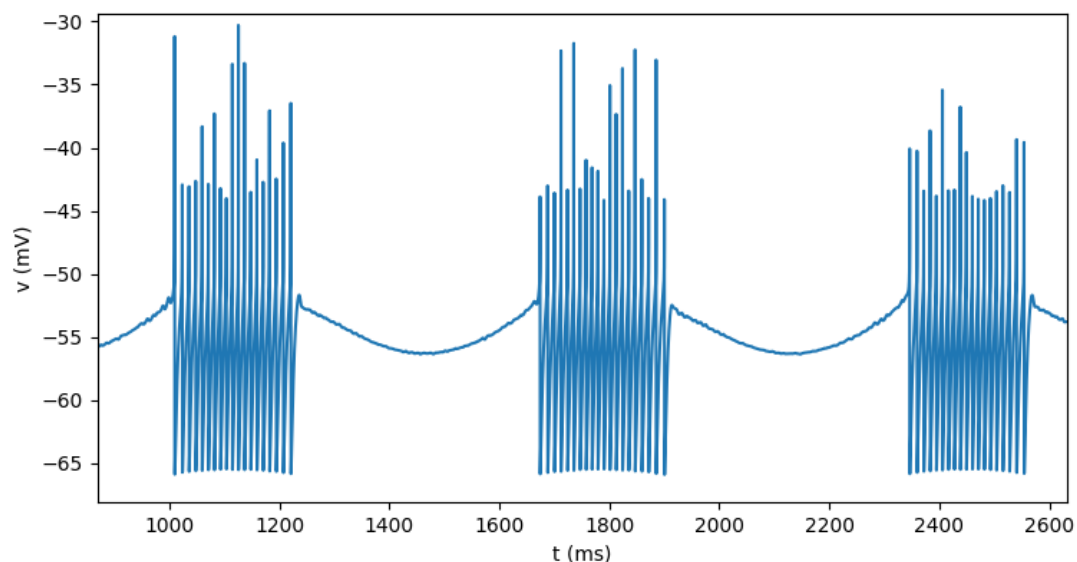


рис.1. Зависимость мембранного потенциала для митральной клетки от времени

Список публикаций:

- [1] Carey RM, Sherwood WE, Shipley MT, Borisyuk A, Wachowiak M. Role of intraglomerular circuits in shaping temporally structured responses to naturalistic inhalation-driven sensory input to the olfactory bulb. *J Neurophysiol* 113: 3112–3129, 2015.
- [2] Bathellier B, Lagier S, Faure P, Lledo PM. Circuit properties generating gamma oscillations in a network model of the olfactory bulb. *J Neurophysiol* 95: 2678–2691, 2006.

## Применение композита ПДМС/УНТ в качестве сухого электрода регистрации биоэлектрической активности

*Назаров Алексей Дмитриевич*

*Золотухин Владимир Васильевич, Костюлин Денис Владикович, Шапошников Дмитрий Григорьевич,  
Экизян Аведик Хачатурович*

*Южный федеральный университет*

*Шапошников Дмитрий Григорьевич, к.т.н.*

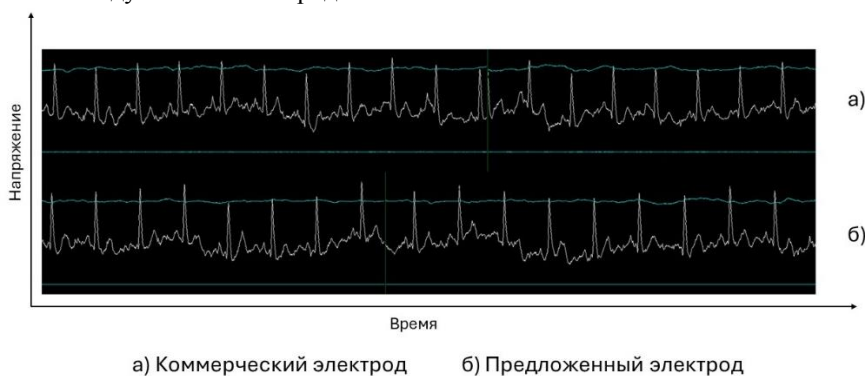
*[anazar@sfedu.ru](mailto:anazar@sfedu.ru)*

В последнее время композитные полимерные сухие электроды в приложениях для определения жизненно важных показателей и датчиков биосигналов вызывают всё больший интерес. Такие электроды можно сделать гибкими и мягкими, чтобы обеспечить комфорт при длительном ношении, что может стать альтернативой коммерческим электродам, а именно жёстким металлическим электродам и влажным электродам [1].

Материалы играют решающую роль в конструкции композитных электродов и существенно влияют на их характеристики. Например, углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой одномерные углеродные наноматериалы, обладающие высокой электропроводностью и биосовместимостью. Полидиметилсилоксан (ПДМС), гидрофобный силикон, широко используется в биомедицине, поскольку он обладает высокой биосовместимостью, эластичностью, податливостью и химической стабильностью. Сочетание этих материалов в гибких сухих электродах потенциально может повысить качество и стабильность записи биосигналов, например, электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [2].

В этом исследовании был изготовлен электрод из композита ПДМС/УНТ. Этот электрод оценивался в трёх экспериментах. Качество сигнала жизненно важных показателей оценивалось с помощью измерений электрокардиограммы (ЭКГ) и электроэнцефалограммы (ЭЭГ), посредством сравнительного анализа данных, собранных коммерческими сухими электродами из Ag/AgCl и представленными композитными электродами. Так же были проведены эксперименты с закрытыми/открытыми глазами и по обнаружению альфа-ритма [3-4].

Измерение ЭКГ проводилось с полосовой фильтрацией на частоте 50 Гц и полосовой фильтрацией от 0,5 до 1000 Гц с частотой дискретизации 250 Гц. Как показано на *рис. 1* в верхней (а) и нижней (б) строках были представлены сигналы ЭКГ от коммерческого и предлагаемого сухого электрода соответственно, из чего видно, что разница в сигналах между обоими электродами незаметна.



*рис.1. Измерение ЭКГ с использованием предлагаемого электрода*

Измерения ЭЭГ проводились с полосовой фильтрацией от 1 до 40 Гц с частотой дискретизации 250 Гц. В эксперименте с обнаружением альфа-ритма средний коэффициент когерентности в диапазоне альфа-частот в соседних отведениях с разными электродами равнялся 0.81.

Предлагаемый нами сухой электрод является мягким, гибким и может регистрировать биоэлектрическую активность без использования проводящего геля. Таким образом, он подходит и потенциально может быть использован в качестве электродной части носимых устройств для интерфейса «мозг-компьютер» (ИМК) и различных медицинских систем.

Работа выполнена в рамках проекта Приоритет 2030, проект № СП 11-23-04.

Список публикаций:

[1] Sangantrakul J., Hemakom A., Israsena P. // *IEEE*, 2023. С. 37-40.

[2] Oh J. et al. // *Materials*. 2024. Т. 17. №. 3. С. 668.

[3] Hua H. et al. // *Micromachines*. 2019. Т. 10. №. 8. С. 518.

[4] Jung H. C. et al. // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2012. Т. 59. №. 5. С. 1472-1479.

## Исследование влияния магнитного поля различных конфигураций на всхожесть семян

Орехова Светлана Михайловна

Северо-Кавказский федеральный университет

Закинян Артур Робертович

[smorekhova@mail.ru](mailto:smorekhova@mail.ru)

В настоящее время бобовые культуры широко распространены в пищевой промышленности, в связи с этим возникает необходимость поиска наиболее оптимального метода их выращивания. Одним из возможных способов решения данной проблемы является воздействие на семена магнитным полем. Анализ научных работ указывает на разнообразность результатов данного влияния на процессы эффективности прорастивания и роста растений в гетерогенной среде. Внешнее магнитное поле изменяет траектории движения заряженных частиц в структуре семян и в результате может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на жизненные процессы в растениях. Корреляция между всхожестью семян и определенной конфигурацией воздействующего на них магнитного поля в настоящее время неполно исследована, в связи с чем, возникает необходимость изучения данного вопроса. [1]

Были проведены серии экспериментов для изучения влияния предварительной обработки семян перед прорастиванием и постоянного воздействия на них магнитным полем различных конфигураций на всхожесть, результаты сравнивались с контрольным образцом, пророщенным без дополнительного воздействия. В целях достижения репрезентативности эксперимента каждая серия была повторена на 5 образцах. В представленных материалах анализируется среднее значение. Образцом считается выборка из 20 семян. Конфигурацией магнитного поля в данной работе является:

- пространственной – различие направления силовых линий, проходящих через плоскость, в которой располагаются семена, относительно направления силы тяжести;

- временной – различие времени предварительной обработки семян.

Методика эксперимента, направленного на изучение влияния различных пространственных конфигураций на всхожесть заключалась в следующем: семена чечевицы алтайской подверглись воздействию однородного поля, создаваемого электромагнитом. Для изменения направления силовых линий магнитного поля производилось изменение положения электромагнита в пространстве (поворот). Затем семена были помещены в гидропонный прорастиватель на 54 часа. В течение всего эксперимента определяется всхожесть всех групп по формуле (1):

$$X = \left(\frac{N}{20}\right) * 100\% \quad (1)$$

где X – всхожесть семян, N – количество проросших семян.

Также была проведена серия экспериментов, направленная на изучение влияния различных временных конфигураций магнитного поля на величину всхожести семян. Методика данной серии заключалась в следующем: семена чечевицы алтайской подвергались воздействию однородного поля, создаваемого электромагнитом, после этого семена помещались в гидропонный прорастиватель на 54 часа. В течение всего эксперимента рост семян контролировался, и определялась всхожесть всех групп по формуле (1).

Затем проводился эксперимент по исследованию влияния постоянного воздействия магнитного поля на прорастание семян чечевицы алтайской. Семена были помещены в экспериментальные установки, представляющие из себя влажную среду на ниодимовом ( $B = 12,6$  мТл) и ферритовом ( $B = 0,5$  мТл) магнитах соответственно. Для исключения влияния на эксперимент внешних параметров все образцы находились в одном хорошо освещаемом и проветриваемом месте, но установки располагались на достаточном расстоянии друг от друга, вследствие чего не происходило смешения воздействия магнитных полей установок на образцы, и не нарушалась чистота эксперимента. В течение всего опыта определяется всхожесть всех групп по формуле (1).

В ходе проделанной работы было выявлено, что наиболее благотворно на семена влияет предварительная обработка в течение 9 минут магнитным полем индукцией 8 мТл, частотой 16 Гц, с направлением силовых линий против силы тяжести, увеличивая их всхожесть на 15%. Также ускоряет процесс прорастания семян и увеличение их вегетативной массы постоянная обработка магнитным полем индукцией 12 мТл на протяжении всего периода прорастивания. Но также магнитное поле определенных параметров способно ингибировать процесс роста. А именно магнитное поле с характеристиками:  $\nu = 100$  кГц, направление силовых линий против силы тяжести способствует образованию чрезмерного количества свободных радикалов, что замедляет прорастание семян, снижая их всхожесть на 50% при предварительной обработке в течение 30 минут и на 26% при 9-ти минутной обработке.

Список публикаций:

[1] Орехова С. М. // *Зернобобовые и крупяные культуры. Изд-во Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур»*. 2023. № 2(46). С.66-73.



## Изучение влияния магнитного поля на структурообразование в биологически совместимой эмульсии

Орехова Светлана Михайловна

Закинян Артур Робертович

Северо-Кавказский федеральный университет

Закинян Артур Робертович

[smorekhova@mail.ru](mailto:smorekhova@mail.ru)

Процессы структурообразования и микроперемешивания можно использовать для интенсификации движения жидкости в промышленности, в медицине, например, для лечения тромбозов [1].

В данной работе предлагается использование магнитоуправляемой биологически совместимой дисперсной системы, представляющей собой микроэмульсию, для управления процессами микроперемешивания, которые можно использовать для повышения эффективности тромболитиков. Для изучения структур, возникающих в данной системе под воздействием вращающегося магнитного поля, была проведена серия экспериментов с биосовместимой микроэмульсией.

Методика исследования состояла из нескольких этапов. Первый этап: изготавливалась магнитная жидкость на вазелиновом масле путем замены жидкости-носителя из ферромагнитной жидкости на керосине, стабилизированной олеиновой кислотой. Замена жидкости-носителя происходила по следующей технологии: вазелиновое масло нагревалось до 100 °С, затем по капельно при постоянном нагреве и перемешивании ультразвуковым гомогенизатором вводилась ферромагнитная жидкость на керосине.

Далее полученная магнитная жидкость на вазелиновом масле эмульгировалась в физиологическом растворе, полученные капли с диаметром 1 мкм стабилизировались соевым летицином (рис. 1). Методика получения микроэмульсии состояла из: нагрева 5 мл смеси поверхностно-активного вещества – соевого летицина и физиологического раствора до 55 °С, затем по капельного ввода 0.05 мл (1%) полученной на предыдущем этапе ферромагнитной жидкости, с интервалом между каплями 7 минут.

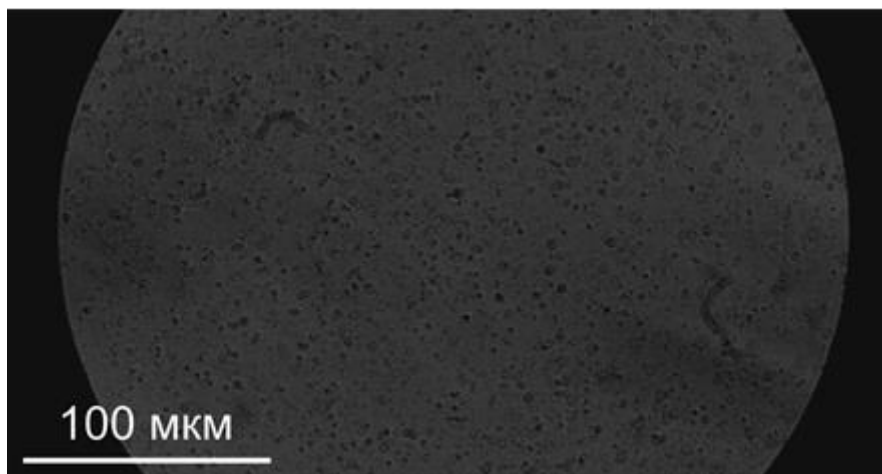


рис.1. Микрофотография биологически совместимой микроэмульсии

Третий этап: полученная микроэмульсия помещалась в тонкую плоскую ячейку Хеле-Шоу, которая представляла собой предметное и покровное стекла, и помещалась в область однородности магнитного поля системы двух пар катушек Гельмгольца, которые создавали вращающееся магнитное поле, благодаря разности фаз токов, питающих катушки 90°.

Выявлено, что под воздействием вращающегося магнитного поля микрокапли формируют цепочки и начинают вращаться (рис. 2). Данный процесс структурообразования зависит от частоты магнитного поля. Обнаружено, что конечная длина образующихся цепочек уменьшается с увеличением частоты. Это происходит из-за гидродинамического момента сил, действующего на цепочку. При сильном увеличении частоты магнитного поля капли начинают собираться в изотропные кластеры. С ростом величины магнитного поля длина цепочек напротив возрастает вследствие увеличения магнитных взаимодействий между каплями.



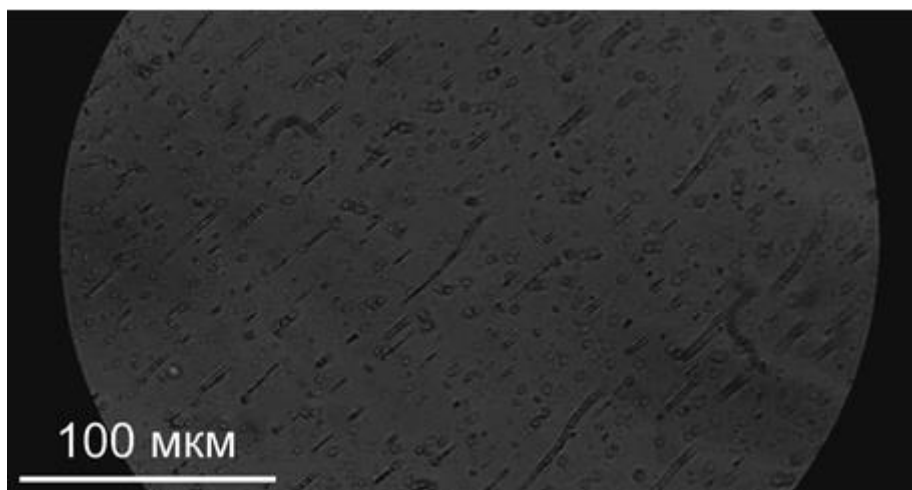


рис.2. Микрофотография биологически совместимой микроэмульсии

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что имеет место возможность управления закономерностями структурообразования в системе капель магнитной микроэмульсии при помощи магнитного поля и использования данных процессов в медицине для интенсификации движения жидкости для повышения эффективности тромболитиков.

Список публикаций:

[1] Clements M. J. A mathematical model for magnetically-assisted delivery of thrombolytics in occluded blood vessels for ischemic stroke treatment // Doctoral dissertation, Texas University, 2016.

## Электретные свойства и биоэнергетика структур органического происхождения

*Савинов Данил Сергеевич*

*Мирошник Дарья Дмитриевна, Евдокимова Алина Игоревна, Максимова Наталья Тимофеевна*

*Иркутский государственный университет*

*Максимова Наталья Тимофеевна, к.ф.-м.н.*

*[dankatawer@gmail.com](mailto:dankatawer@gmail.com)*

Значимость электретного эффекта в биологических структурах обусловлена его ролью в ряде фундаментальных биофизических явлений. В частности, электретный эффект используется при изготовлении материалов с антитромбогенными свойствами поверхности. Проводятся работы по применению электретов для ускорения срастания мягких тканей с костью, по стимуляции регенерации мягких тканей и свежих переломов [1, 2], а также другие исследования, показывающие возможность эффективного использования электретов в медицине. В биологических структурах живого организма формируются электрические потенциалы, изменением которых в значительной степени обеспечивается жизнедеятельность биологического объекта. Одним из наиболее информативных методов исследования биологических систем может служить электретно-термический анализ [3]. Он может позволить изучить процессы релаксации заряда в среде при ее нагревании. Форма и положение пиков в спектре термостимулированных токов позволяют выявить механизм удержания заряда биоэлектретом [3]. Характерный для биоэлектретов эффект поляризации и запоминания заряда и связан с воздействием слабых электрических и магнитных полей. Такие воздействия в объектах биологического происхождения осуществляются в ходе структурных перестроек через их водные среды. Проведенные исследования показывают, что электретные состояния могут наблюдаться во всех веществах, содержащих диполи или ионы. Вместе с тем, в случае гидратированного объекта электретное состояние может быть обусловлено наличием связанной или структурированной воды. Как отмечено в работе [4], в биологических явлениях можно выделить два вида энергии: энергия валентных связей, запасенная в химических соединениях, и «энергия миграции» в биохимических процессах. В биологических объектах вода находится в связанном состоянии и имеет особую структуру. Такая вода представляет собой жесткую среду, способствующую накоплению и распространению энергии.

Целью работы являлось изучение условий запасаения заряда в биоэлектретной среде на основе структур органического происхождения и выяснение роли структурированной воды в обеспечении этого эффекта. Исследования проводились методами термостимулированных токов (ТСТ), а также абсорбционной и люминесцентной спектроскопии. Преследовалась цель установления природы электронных ловушек, обеспечивающих долговременное запасаение энергии, а также связь этих ловушек с наличием образований

определённого типа. В качестве объектов исследования были выбраны биологические объекты растительного и животного происхождения: образцы растительной структуры (*crassula*), мотыль (личинка *chironomidae*), белок куриного яйца, а также дендробена (*lumbricus terrestris*). Обнаружено, что все исследуемые образцы проявляют свойства электрета (*pic.1*). Общий запас поляризации вещества может быть оценен по измерению площади под кривой зависимости величины тока от температуры. В работе обсуждается природа пиков на кривой ТСТ, структура электронных ловушек и их связь с продуктами термической денатурации белков, входящих в состав исследуемых органических структур.

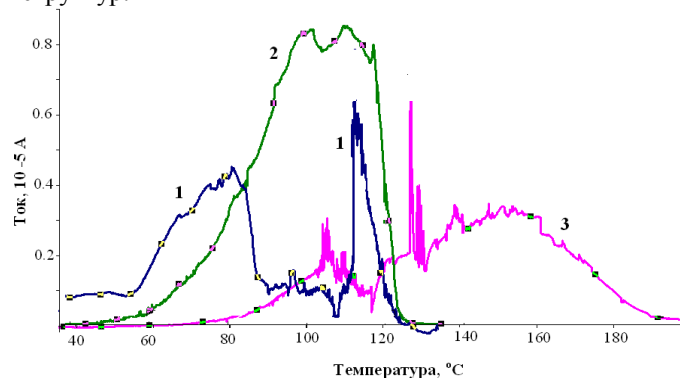


рис.1. Спектры ТСТ исследуемых объектов. 1- белок куриного яйца, 2- мотыль (*chironomidae*), 3 –дендробена (*lumbricus terrestris*).

Список публикаций:

- [1] Александрова О.И., Александрова С.А., Хомутов В.П. и др. //ЖТФ. 2018. Т.88 №9. С. 1348.  
 [2] Хомутов В.П., Нелин Н. И., Котов В.И. и др. // Современная медицина. 2019. Т. 2. №14. С. 2–6.  
 [3] Электреты / Под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983. 487 с.  
 [4] Кулин Е.Т. // Биоэлектретный эффект. Минск: Наука и техника, 1980. 216 с.

## Воздействие нитрата тория на интенсивность биолюминесценции двух сопряженных реакций, катализируемых бактериальными ферментами

Семенова Александра Алексеевна<sup>1</sup>

Медведев Вадим Викторович<sup>1</sup>, Колесник Ольга Владиславовна<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук

Сачкова Анна Сергеевна, к.б.н.

[a.smnv296@gmail.com](mailto:a.smnv296@gmail.com)

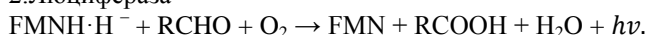
Соединения Th-232 являются альфа-излучающими веществами, представляющими собой опасность для жизни и здоровья человека, а также для состояния окружающей среды [1]. Биологические методы контроля в ряде ситуаций, позволяют быстро оценивать качество окружающей среды и наличие некоторых загрязнений, не обнаруживаемых химическими методами. К биологическим методам контроля относятся биоиндикация и биотестирование [2].

В последнее время биолюминесцентный анализ стал одним из перспективных методов биологического не только мониторинга водной среды [3], но и изучения механизмов воздействия токсикантов на живые системы, или их прототип. В работе использовали люминесцентную систему двух сопряженных реакций, катализируемых ферментами NAD(P)H:FMN-оксидоредуктазой и люциферазой:

1. NADH, FMN-оксидоредуктаза



2. Люцифераза



Данная система является моделью живой клетки по изменению её параметров можно косвенно судить о состоянии организма. Было исследовано влияние нитрата тория различных концентраций на интенсивность биолюминесценции и генерацию активных форм кислорода (АФК).

Для регистрации кинетики хемилюминесцентного и биолюминесцентного сигналов использовался планшетный биолюминометр Luminoskan Ascent. Используемые реактивы: комплекс реактивов аналитической биолюминесценции (КРАБ); C<sub>14</sub>H<sub>28</sub>O; торий азотнокислый; дистиллированная вода; NADH; FMN.

Проводили измерения интенсивности биолюминесценции и содержания АФК при концентрациях тория азотнокислого в диапазоне концентраций от  $10^{-11}$  М до  $10^{-5}$  М. Интенсивность свечения системы в растворах  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  концентрации от  $10^{-11}$  М до  $10^{-7}$  М близки к контролю, т.е. не вызывают значительную активацию или ингибирование. В то время как концентрации  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  в интервале  $10^{-5}$ – $5 \cdot 10^{-6}$  М активируют биолюминесценцию во всем временном промежутке эксперимента. Так, при концентрации  $10^{-6}$  М активация составляет примерно 20-40%, при этом максимум соответствует двукратному увеличению интенсивности свечения относительно контроля и равен  $2,15(I^{\text{rel}})$  при 120 минутах. В то время как при 150 минутах активация идет на спад, и относительная интенсивность свечения снижается до 1,6. Скорее всего, спад может быть связан с временем протекания реакции, т.е с расходом субстратов и фермента. Активация в целом может быть результатом и радиационного воздействия  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  на субстраты и, в первую очередь, на фермент, вызывая усиление свечения. При этом стоит отметить, что не представляется возможным работать с большими концентрациями  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ , для подтверждения активационного эффекта, т.к. они создают кислую среду, непригодную для работы системы.

Было исследовано относительное содержание АФК в растворах системы двух сопряженных реакций от времени в растворах нитрата тория с концентрациями от  $10^{-11}$  М до  $10^{-5}$  М. При всех концентрациях раствора  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  наблюдается падение содержания АФК при первых 20 минутах. Далее уровень АФК приближается к контролю. Из общей тенденции выделяются только зависимость количества АФК в растворах  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  в концентрации  $10^{-6}$  М. При данной концентрации наблюдается увеличение содержания АФК начиная от 50 минут от 20 % до 40 %.

В результате проведенных экспериментов показано, что интенсивность биолюминесценции и АФК имеют обратную зависимость. При 20 минутах свечение системы увеличивается примерно на 20 %, снижение кривой АФК имеет схожую тенденцию. Рассчитан коэффициент корреляции между интенсивностью биолюминесценции и образованием АФК на примере раствора нитрата тория с концентрацией  $10^{-6}$  М. Он составил  $(r) = -0,82$ . Отрицательное значение свидетельствует, что при росте биолюминесценции происходит снижение образования АФК. Значения коэффициента по модулю более 0,7 ( $r = 0,71-0,99$ ) говорит о высокой степени корреляции между этими двумя зависимостями, в нашем случае между интенсивностью биолюминесценции и образованием АФК

Таким образом, было определено влияние тория азотнокислого на интенсивность биолюминесценции и генерацию АФК в биолюминесцентной системе, катализируемой NAD(P)H:FMN-оксидоредуктазой и люциферазой. Исследована зависимость между биолюминесцентным откликом и снижением образования АФК в водных растворах с добавлением токсиканта.

Список публикаций:

- [1] Студопедия. Факторы и группы токсичности радионуклидов. [https://studopedia.ru/2\\_5924\\_faktori-i-gruppi-toksichnosti-radionuklidov.html](https://studopedia.ru/2_5924_faktori-i-gruppi-toksichnosti-radionuklidov.html)
- [2] Биоиндикация и биотестирование загрязнений природной среды: курс лекций / Семенова А.Ю., Малько С.В.; Керченский государственный морской технологический университет. – Керчь: КГМТУ, 2020. – 23 с.
- [3] Колесник О.В., Рожко Т.В., Лапина М.А., Соловьёв В.С., Сачкова А.С., Кудряшева Н.С. // MDPI. *Bioengineering*. 2021. Т. 8. № 194. С. 1–13.

## 12 - Геофизика: земная кора, океан, атмосфера

Веселова Елизавета Юрьевна, 3 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет

**Вертикальные профили характеристик электрического поля вблизи земной поверхности по результатам экспедиционных исследований**

Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru) стр. 216

Гурбангелдиев Дидар Азадович, 5 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет

**Результаты экспедиционных исследований концентрации радона-222 в приземном слое атмосферы**

Панчишкина Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru) стр. 217

Егорова Виктория Михайловна, инженер

Москва, Институт водных проблем РАН

**Моделирование топографических вихрей восточной части Средиземного моря в рамках трехслойной модели океана**

Соколовский Михаил Абрамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [Vikchik96@yandex.ru](mailto:Vikchik96@yandex.ru) стр. 219

Звалинская Анастасия Павловна, 2 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет

**Закономерности вариаций электропроводности приземной атмосферы с учетом содержания радона-222 и субмикронных аэрозолей**

Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru) стр. 220

Кондратьева Элина Романовна, 3 курс

Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет

**Влияние метеоусловий и аэрозольного состояния приземной атмосферы на ток механического переноса из атмосферы на землю по данным наблюдений**

Панчишкина Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru) стр. 222

Шатохин Михаил Викторович, аспирант 2 года обучения

Москва, Институт водных проблем РАН

**Численное моделирование динамики пятен пассивной примеси в окрестности гайота в океане**

Соколовский Михаил Абрамович, д.ф.-м.н.

e-mail: [usif-9694@mail.ru](mailto:usif-9694@mail.ru) стр. 224

## Вертикальные профили характеристик электрического поля вблизи земной поверхности по результатам экспедиционных исследований

Веселова Елизавета Юрьевна

Кондратьева Элина Романовна

Южный федеральный университет

Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н.

[georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)

Фундаментальной проблемой атмосферного электричества является недостаток информации о происхождении электрического поля Земли и причинах устойчивости его вариаций, поэтому на сегодняшний день актуальным остаётся дальнейшее совершенствование физико-математической модели электрических процессов вблизи земной поверхности. Основными факторами, определяющими электрическое состояние приземного слоя атмосферы, являются, прежде всего, радиоактивность почвы и атмосферы, содержание аэрозолей и турбулентное перемешивание. Исследование характеристик электрического поля является на данный момент актуальным в анализе данных, которые получены в научных экспедициях лаборатории геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета. Многолетние комплексные исследования электродного слоя атмосферы включают традиционные измерения атмосферно-электрических характеристик наряду с измерениями метеорологических и других значимых параметров.

В данной работе рассматриваются результаты измерений в августе 2023 года в летней экспедиции вблизи хутора Чернигово-Песчаный Кашарского района Ростовской области, расположенного в засушливой зоне донских степей. Измерения в период экспедиции производились непрерывно и круглосуточно на обширной ровной площадке со скошенным травостоем. Параметры атмосферы измерялись традиционными, известными и широко распространенными методами. Градиент электрического потенциала на уровне земли измерялся с помощью флюксметра «Поле-2» системы ГГО им. А.И.Воейкова. Методом радиоактивного коллектора измерялись потенциалы на высотах 1, 2, 3 и 4 метра. Регистрация концентрации аэрозолей осуществлялась лазерным аэрозольным спектрометром ЛАС-П системы НИФХИ им. Л.Я.Карпова в семи размерных диапазонах: 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-0,7; 0,7-1,0; >1,0 мкм. Для анализа в этой работе использовались результаты 10-минутных и среднечасовых осреднений всех величин.

На рис. 1 представлены вертикальные профили электрического потенциала (1), осредненные для устойчивой (а) и неустойчивой (б) стратификации нижнего слоя атмосферы, и восстановленные по ним профили градиента потенциала (2) и плотности объемного заряда (3). Планками на графиках показана стандартная погрешность. Вид полученных профилей, в целом, идентичен тем, что наблюдались ранее в аналогичных условиях [1].

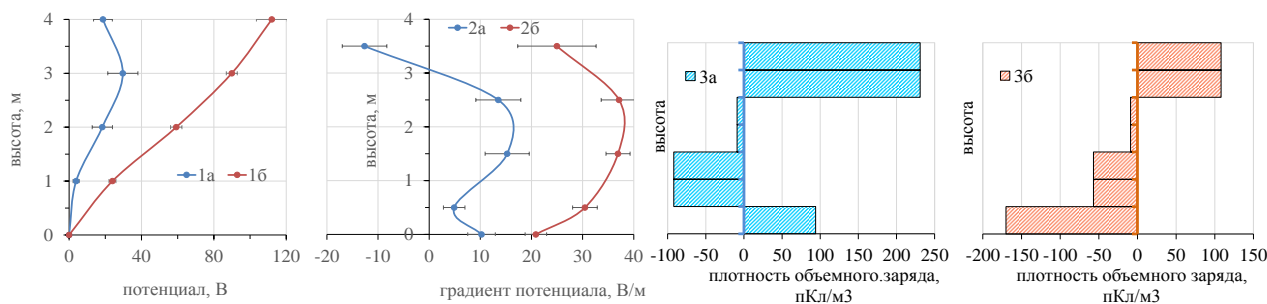


рис.1. Вертикальное распределение электрического потенциала (1), градиента потенциала (2), плотности объемного заряда (3) для устойчивой (а) и неустойчивой (б) стратификации приземного слоя (п. Чернигово-Песчаный Кашарского района Ростовской области, август 2023)

Результаты предыдущих исследований [2] обнаруживают, что вариации градиента потенциала вблизи земной поверхности в значительной степени коррелируют с содержанием в приземном слое аэрозольных частиц субмикронного размера. Объемный заряд, локализованный на этих частицах, в соответствии с уравнением Пуассона формирует пространственное распределение характеристик поля: в слоях с положительным объемным зарядом градиент потенциала претерпевает уменьшение с высотой, в отрицательно заряженных слоях – увеличивается по высоте. Заряды аэрозолей могут определяться адсорбцией ими зарядов легких ионов. Причиной возникновения слоев объемного заряда легких ионов являются: 1) дивергенция тока проводимости на границе атмосферы с земной поверхностью, вблизи которой формируется положительный объемный заряд электродного эффекта этой поверхности, и 2) прохождение через атмосферу тока проводимости в условиях градиента ее электропроводности. Градиент электропроводности может быть значительным при активном эманировании почвы и высокой концентрации радона-222 близ ее поверхности. Он будет иметь отрицательный знак, что обусловит появление отрицательного объемного заряда в слое.

Накоплению радона-222 вблизи поверхности земли способствует ослабление перемешивания в условиях устойчивой стратификации. В таблице приведены параметры атмосферы, характеризующие условия, в которых были получены вертикальные профили атмосферно-электрических величин.

Параметр		$t, ^\circ\text{C}$	$U, \text{м/с}$	$f, \%$	$K_{\text{турб}}, \text{м}^2/\text{с}$	$Rn-222, \text{Бк/м}^3$	$N, \text{см}^{-3}$
Высота датчика		2 м	2 м	2 м	0-2 м	0,05 м	1 м
Устойчивая стратификация	средние	<b>15,7</b>	<b>0,0</b>	<b>90</b>	<b>0,00</b>	<b>198</b>	<b>454</b>
	ст.отклон.	2,2	0,0	6	0,00	244	57
	ст.погрешн.	0,8	0,0	2	0,00	92	22
Неустойчивая стратификация	средние	<b>29,6</b>	<b>4,0</b>	<b>40</b>	<b>0,17</b>	<b>18</b>	<b>410</b>
	ст.отклон.	1,0	0,5	7,4	0,03	9,1	122
	ст.погрешн.	0,4	0,2	2,6	0,01	4,1	43

Особенностью данного цикла измерений явились аномально высокие значения объемной активности радона-222, которые в условиях слабого турбулентного перемешивания при устойчивой стратификации приземного слоя превышали вблизи земной поверхности  $700 \text{ Бк/м}^3$ . Это способствовало возникновению больших отрицательных градиентов электропроводности в слое 0,5-1,5 м и, как следствие, приводило к формированию отрицательного объемного заряда в этой области (рис.1, 3а), понижающего временами поле на уровне земной поверхности практически до нуля и до отрицательных значений. Рассчитанное по результатам всех измерений уравнение линейной регрессии градиента потенциала на уровне земли ( $G_0, \text{В/м}$ ) по значениям объемной активности радона-222 ( $Rn, \text{Бк/м}^3$ ) имеет вид  $G_0 = 27 - 0,15 \cdot Rn$  ( $R^2=0,47$ ). В условиях неустойчивой стратификации приземного слоя в дневные часы при интенсивном перемешивании атмосферы содержание радона вблизи земли невелико, а наблюдаемый в нижнем двухметровом слое отрицательный объемный заряд (рис.1, 3б) обусловлен, по-видимому, зарядом аэрозольных частиц, поступающих в атмосферу в результате ветрового подъема пыли с иссушенной земной поверхности в условиях знойного лета донских степей [2].

Список публикаций:

- [1] Петрова Г.Г., Петров А.И., Панчишкина И.Н. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. Изд-во научно-исследовательского радиофизического института, Н.Новгород. Т.56, № 11-12. 2013. С.803-819.  
<http://elibrary.ru/item.asp?id=21303258>
- [2] Веселова Е.Ю., Милованова А.А., Петрова Г.Г. // Сборник тезисов, материалы Двадцать седьмой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых: Екатеринбург: издательство АСФ России, 2023.с. 182-183  
<http://asf.ural.ru/VNKSF/Tezis/v27/VNKSF-27-12.pdf>

## Результаты экспедиционных исследований концентрации радона-222 в приземном слое атмосферы

**Гурбангелдиев Дидар Азадович**

*Звалинская Анастасия Павловна*

*Южный федеральный университет*

*Панчишкина Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.*

*[georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)*

Естественная радиоактивность является одной из природных составляющих окружающей среды, радиоактивные элементы существуют повсеместно, и радиация, связанная с ними, представляющих большой интерес с экологической точки зрения. Особенно велика роль в радиационном воздействии на человека радона-222 и продуктов его распада.

Радон образуется в почве и попадает в атмосферу в результате газообмена между почвой и атмосферой. Поступление радиоактивных газов из почвы в атмосферу определяется содержанием материнских радиоактивных элементов в почве, эманирующей способностью подстилающих пород, концентрацией радона в почвенном газе и состоянием поверхности почвы. В атмосфере эманиции распространяются до высот в несколько километров вследствие конвективных потоков и турбулентного перемешивания. Поток радона из почвы и его содержание в атмосферном воздухе существенно отличаются для различных регионов и характеризуется значительной пространственно-временной неоднородностью. Таким образом, формирование радоновой обстановки в приземной атмосфере происходит под влиянием большого количества факторов, что затрудняет точное математическое описание механизмов переноса радона.

В 2023 году в комплексной геофизической экспедиции кафедры общей физики Южного федерального университета в летний период в х.Чернигово-Песчаном Кашарского района Ростовской области проводились измерения плотности потока радона (ППР) из почвы в атмосферу и концентрации радона-222 в нижнем слое атмосферы. Для измерений концентрации радона-222 в атмосферном воздухе и плотности потока радона-222 использовался радон-монитор «AlphaGUARD», основной частью которого является ионизационная камера. Измерения концентрации радона в атмосфере проводились на пяти уровнях над земной поверхностью (0,05, 0,3, 0,6, 1 и 2 метра).

Измерения плотности потока радона-222 осуществлялось с помощью накопительной камеры, в которую поступал почвенный газ в течение времени экспозиции 20 минут. После этого проба воздуха из накопительной камеры с помощью насоса «AlphaPUMP» помещалась в ионизационную камеру радон-монитора для обработки. Полученное значение объемной активности (концентрации) радона  $A_{Rn}$  в исследуемом воздухе использовалась для расчёта ППР:

$$\text{ППР} = \frac{A_{Rn} \cdot V}{S \cdot t} \quad (1)$$

где  $V=0,5$  л – объём пробы,  $S=0,015$  м<sup>2</sup> – площадь накопительной камеры,  $t=1200$ с – время экспозиции.

Для выделения однородных условий формирования профиля концентрации радона-222 в атмосфере был отобран массив среднечасовых значений концентрации радона-222 в атмосферном воздухе и плотности потока радона-222 при скорости ветра на высоте 2 м меньше 0,8 м/с. В результате корреляционного анализа установлена положительная связь концентрации радона-222 в атмосфере на всех высотах над поверхностью почвы с плотностью потока радона-222 (*табл.*) при средней скорости ветра 0,4 м/с. С увеличением высоты коэффициент корреляции закономерно убывает.

высота	0,05 м	0,3 м	0,6 м	1,0 м	2,0 м
коэффициент корреляции	0,37	0,35	0,34	0,32	0,27

По результатам измерений построен эмпирический ряд регрессии концентрации радона-222 в атмосферном воздухе по плотности потока радона-222 рассчитано уравнение линии регрессии. Обнаружено, что связь между концентрацией радона-222 в атмосфере на всех высотах над поверхностью почвы и плотностью потока радона-222 подчиняется линейному закону с высокой степенью достоверности аппроксимации.

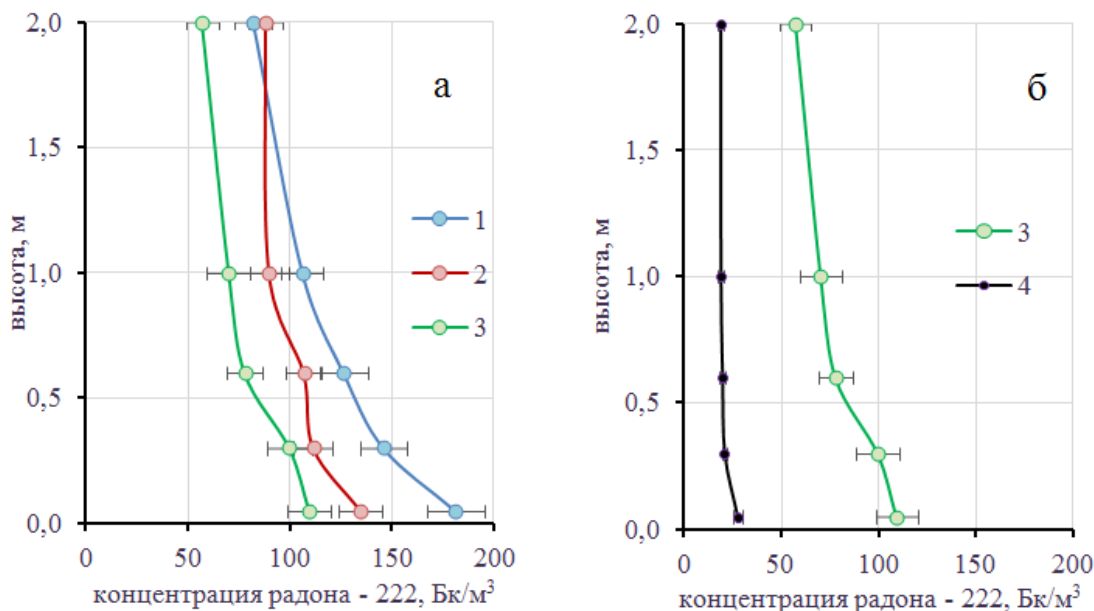


рис.1. Вертикальные профили концентрации радона-222 в х. Чернигово-Песчаном, август 2023 г.

а) при ограничении скорости ветра на высоте 2 м ( $U_2 < 0,8$  м/с) и различных средних значениях плотности потока радона-222: 1 - 23,6 мБк/м<sup>2</sup>с; 2 - 18,9 мБк/м<sup>2</sup>с; 3 - 15,2 мБк/м<sup>2</sup>с;

б) одинаковой плотности потока радона-222 и различных значениях скорости ветра на высоте 2 м: 3 -  $U_2 < 0,8$  м/с; 4 -  $U_2 > 3,0$  м/с

В отсутствие значительного перемешивания атмосферы происходит накопление радона-222 в приземном слое атмосферы, что предполагает в таких условиях возрастание концентрации радона-222 в атмосферном воздухе при увеличении плотности потока радона-222 с земной поверхности. По наблюдениям на выход радона

из почвы при прочих равных условиях влияет распределение температуры почвы по глубине: чем теплее почва на глубине по сравнению с поверхностными слоями, тем больше радона в атмосфере у земной поверхности [1].

По данным экспедиционных измерений построены профили концентрации радона-222, осредненный для различных интервалов значений плотности потока радона-222 (рис. 1а). Профиль 1 (голубая линия) получен при наиболее интенсивном поступлении эманации в атмосферу, плотность потока радона-222 в среднем для этого профиля составил 21,8 мБк/м<sup>2</sup>с. Профиль 2 (красная линия) и профиль 3 (зеленая линия) осреднены для периодов, которые характеризовались более низкими в среднем значениями плотности потока радона-222: 18,9 мБк/м<sup>2</sup>с и 15,2 мБк/м<sup>2</sup>с соответственно. Планками показаны значения стандартной погрешности

В то же время, при разной скорости ветра (рис. 1б) и практически одинаковой интенсивности поступления в атмосферу радона-222 (ППР порядка 15 мБк/м<sup>2</sup>с для профилей 3 и 4), обнаруживается существенное различие как в средних значениях, так и в характере изменения концентрации радона-222 с высотой. При скорости ветра на высоте 2 м, превышающей значение 3 м/с, вертикальные градиенты концентрации радона-222 становятся незначительными (профиль 4, черная линия), а сами значения в 4–5 раз меньше, чем при ослабленном перемешивании атмосферы.

Список публикаций:

[1] Петрова Г.Г. и др. // Глобальная электрическая цепь: материалы пятой Всероссийской конференции 2021. С. 56.

## **Моделирование топографических вихрей восточной части Средиземного моря в рамках трехслойной модели океана**

***Егорова Виктория Михайловна***

*Институт водных проблем Российской академии наук*

*Соколовский Михаил Абрамович, д.ф.-м.н.*

*[Vikchik96@yandex.ru](mailto:Vikchik96@yandex.ru)*

Общая циркуляция восточной части Средиземного моря, по натурным данным, представляет собой совокупность меандрирующих течений и крупномасштабных вихрей (например, круговорот Родоса) [1, 2]. К югу от острова Кипр располагается стационарный антициклонический Кипрский вихрь. Он фиксируется над обширной окрестностью подводной горы Эратосфена, расположенной в юго-восточной части глубокой впадины. Работы [2, 3, 4] описывают периодическое появление циклона северо-западнее Кипрского вихря.

В работах [5, 6] дается теоретическое обоснование природы формирования и сосуществования Кипрского вихря и циклона как топографической квазидипольной вихревой структуры, состоящей из антициклона над горой Эратосфена, и циклона над крупной впадиной. Обоснование основывается на применении теории топографических вихрей, адаптированной для решения задач с несимметричной формой неоднородности рельефа дна. В частности, моделирование вихрей проводится в рамках трехслойной модели океана с применением метода контурной динамики [7, 8]. Фоновый (преимущественно восточный) поток постоянной скорости набегает на неоднородность (типа «впадина-гора»), локализованную в нижнем слое трехслойной жидкости в центре модельной области на безразмерной плоскости XY.

В настоящей работе, помимо структуры «впадина-гора», учтено понижение дна западнее горы Эратосфена. В верхний слой добавлены два крупных контура небольшой завихренности (противоположных знаков), усиливающих фоновый поток и тем самым моделирующих поверхностные течения.

Получившиеся в верхнем слое фазовые портреты (например, рис. 1) (т.е. изолинии функции тока) для случая, учитывающего понижение среднего уровня морского дна западнее горы Эратосфена (панель А), показывают значительное увеличение циклона и его смещение на запад, по сравнению со случаями, не учитывающими такого понижения (панель Б). Этот результат мы можем связать с циклонической циркуляцией, наблюдаемой западнее горы Эратосфена [9]. Глубокая впадина оказывает влияние на фоновое течение, вносит вклад в развитие общей циклонической циркуляции восточной части Средиземного моря, предположительно являясь восточным продолжением круговорота Родоса.



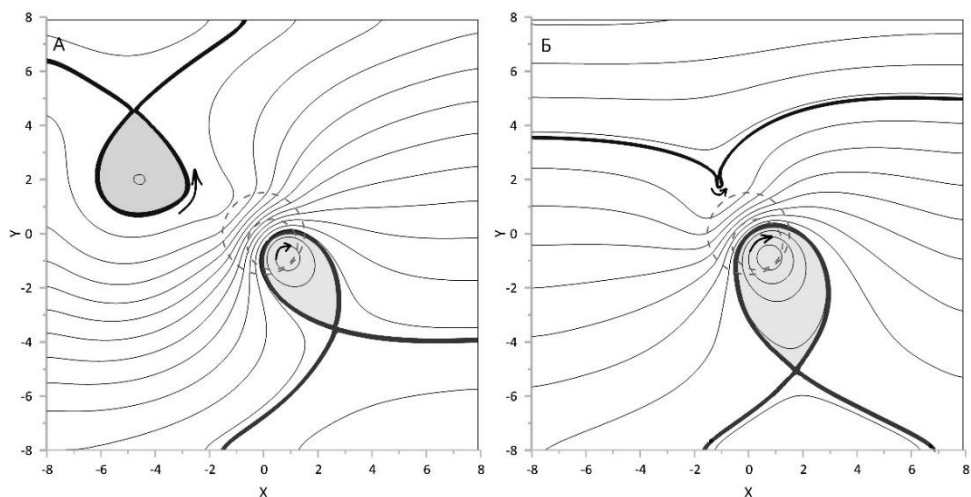


рис 1. Изолинии функции тока горизонтального движения в верхнем слое, штриховая линия обозначает границу топографии «впадина-гора», фоновый поток набегает на топографию слева направо (на восток), а внутренние части петель сепаратрис ассоциируются с захваченными топографическими вихрями: циклон (против часовой стрелки) и антициклонический Кипрский вихрь (по часовой стрелке). На панели А изображен случай, учитывающий понижение дна западнее горы Эратосфена (координаты центра цилиндрического понижения (0, -5), радиус  $r = 4$ ); на панели Б – тот же случай, но без понижения.

#### Список публикаций:

- [1] Pinardi N., Arneri E., Crise A., Ravaioli M., Zavatarelli M. / *The physical, sedimentary and ecological structure and variability of shelf areas in the Mediterranean Sea* // *The Sea*. 2006. vol 14. P.1245-1331.
- [2] Zodiatis G., Gertman I., Poulain P.-M., Menna M. / *The general circulation in the SE Levantine* // *PERSEUS Conference Proceedings: Integrated Marine Research in the Mediterranean and Black Sea, Brussels*. 2015. P.231-232.
- [3] Brenner S. / *Structure and evolution of warm core eddies in the eastern Mediterranean Levantine Basin* // *J Geophys Res*. 1989. vol 94(C9). P.12.593-12.602.
- [4] Mauri E., Sitz L., Gerin R., Poulain P.-M., Hayes D., Gildor H. / *On the variability of the circulation and water mass properties in the Eastern Levantine Sea between September 2016 - August 2017* // *Water*. 2019. vol 11(9). P.1741.
- [5] Egorova V.M., Zyryanov V.N., Sokolovskiy M.A. / *The hydrodynamic theory of the Cyprus Eddy* // *Ocean Dynamics*. 2022. Vol 72(1). P.1-20
- [6] Egorova V.M., Sokolovskiy M.A., Zodiatis G. / *A Three-Layer Model of Hydrodynamic Processes in the Cyprus Eddy System* // *Ocean Dynamics*. 2024. vol 74(1). P.19-36.
- [7] Козлов В.Ф. / *Метод контурной динамики в модельных задачах о топографическом циклогенезе в океане* // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1983. Т. 19. № 8. С.845-854.
- [8] Соколовский М.А. / *Моделирование трехслойных вихревых движений в океане методом контурной динамики* // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1991. Т. 27. № 5. С.550-562.
- [9] Simoncelli S., Fratanni C., Pinardi N., Grandi A., Drudi M., Oddo P. (2014) *Mediterranean Sea physical reanalysis (MEDREA 1987-2017) (Version 1) [Data set] (Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS))*.

## Закономерности вариаций электропроводности приземной атмосферы с учетом содержания радона-222 и субмикронных аэрозолей

**Звалинская Анастасия Павловна**  
**Милованова Анжелика Александровна**  
**Южный федеральный университет**  
**Петрова Галина Григорьевна, к.ф.-м.н.**  
[georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)

Электропроводность атмосферы вблизи земной поверхности, как показывают наблюдения, испытывает значительные изменения в зависимости от интенсивности ионизационно-рекомбинационных процессов. Исследования закономерностей этих вариаций и выявление значимых факторов, определяющих их, представляется важным для моделирования атмосферно-электрических процессов в приземной атмосфере. Накопленные в настоящее время данные позволяют заключить, что важнейшими факторами для этих процессов являются объемная активность радона-222 и концентрация субмикронных аэрозолей в атмосфере.

В работе обсуждаются результаты экспедиции 2023 года в пункте Чернигово-Песчаный Кашарского района Ростовской области в сравнении с данными предыдущих экспедиций, проводимых в летние месяцы

лабораторией геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета. Пункт наблюдений расположен в засушливой зоне донских степей. Датчики располагались на обширном ровном поле со скошенным травостоем. Полярные электропроводности измерялись гердиеновскими датчиками двух типов: прибор «Электропроводность-2» системы ГТО им.А.И.Воейкова и измеритель электропроводности атмосферы системы Литвинова. Объемная активность (ОА) радона-222 в атмосфере и почвенном газе регистрировалась радон-монитором «AlphaGUARD PQ2000 PRO». Для регистрации концентрации аэрозолей использовался лазерный аэрозольный спектрометр ЛАС-П системы НИФХИ им. Л.Я.Карпова в семи диапазонах размеров частиц: 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-0,7; 0,7-1,0; >1,0 мкм. Посредством метеостанции М-49 велась непрерывная регистрация метеорологических параметров. Раз в час производились градиентные измерения метеорологических характеристик, что позволяло рассчитывать значения коэффициента турбулентности (по методу Н.Р.Орленко) и оценивать температурную стратификацию нижнего слоя атмосферы. Комплексные наблюдения производились в августе на протяжении 8 дней, многочасовыми периодами, круглосуточно, с короткими перерывами на профилактику аппаратуры, по причине погодных условий и т.д. Для анализа использованы результаты 10-минутных и среднечасовых осреднений всех величин.

Важнейшим ионизатором приземной атмосферы является  $\alpha$  – радиоактивный инертный газ радон-222. Анализ результатов экспедиции 2023 года показал, что для периода измерений характерно интенсивное эманирование почвы, на что указывают высокие значения потока радона-222 из почвы в атмосферу. При ослаблении перемешивания в условиях устойчивой температурной стратификации приземного слоя это обусловило накопление радона вблизи земной поверхности и, как следствие, его большую активность. В ночные часы без ветра значения объемной активности (ОА) радона порой превышали  $500 \text{ Бк/м}^3$ , что в предыдущих экспедициях не регистрировалось. В итоге значения полярных удельных электропроводностей в ночные периоды превышали  $100 \text{ фСм/м}$ , что прежде не наблюдалось. Тем не менее, уравнения линейной регрессии значений положительной  $\lambda_+$  и отрицательной  $\lambda_-$  удельных электропроводностей по объемной активности радона  $A_{Rn}$  для несгруппированных данных:  $\lambda_- = 18 + 0,25A_{Rn}$  ( $R^2=0,46$ );  $\lambda_+ = 18 + 0,22A_{Rn}$  ( $R^2=0,42$ ), - аналогичны тем, что получены для степного Цимлянска в 2016:  $\lambda_- = 15 + 0,2A_{Rn}$ ,  $\lambda_+ = 16 + 0,2A_{Rn}$ , где содержание радона в атмосфере не превышало  $40 \text{ Бк/м}^3$  из-за ветрового режима. Коэффициенты корреляции полярных электропроводностей и ОА радона по 10-минутным осреднениям величин за период наблюдений для разных высот находятся в интервале 0,8-0,9.

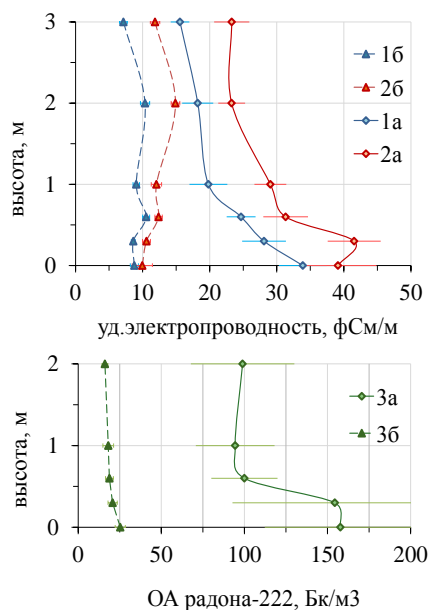


рис.1. Вертикальное распределение положительной (2) и отрицательной (1) удельных электропроводностей атмосферы и объемной активности радона-222 (3) при устойчивой (а) и неустойчивой (б) температурной стратификации приземного слоя (Ч.-Песчаный, август 2023)

На (рис.1) представлены вертикальные профили положительной (красный) и отрицательной (синий) удельных электропроводностей и объемной активности радона-222 (зеленый) в нижнем 3-метровом слое атмосферы для устойчивой (а) и неустойчивой (б) температурных стратификаций приземного слоя (планками на графиках показаны значения стандартной погрешности). Как видно на (рис.1, график 3а), в часы с устойчивой стратификацией (ночной период без ветра, с нулевым коэффициентом турбулентности) ОА радона в открытой атмосфере в 2-метровом слое в среднем принимает значения не менее  $100 \text{ Бк/м}^3$ , что равно ПДК радона-222 для закрытых помещений. Наблюдаются значительные градиенты ОА радона в нижнем метре

атмосферы и, как следствие, значительное уменьшение с высотой ее полярных электропроводностей (рис.1, графики 1а,2а), что будет способствовать формированию слоя отрицательного объемного заряда при прохождении вертикального тока проводимости вблизи земной поверхности. При неустойчивой стратификации (дневные периоды с конвекцией и ветром) атмосфера активно перемешивается, радон переносится в более высокие слои, в результате чего его концентрация вблизи подстилающей поверхности уменьшается, стираются градиенты объемной активности, что можно видеть на (рис.1, 3б). В итоге невелики и мало меняются с высотой полярные электропроводности (рис.1, графики 1б,2б).

Неоднократно показано, что важным фактором для электропроводности атмосферы являются аэрозоли, способствующие ее снижению вследствие адсорбции аэрозольными частицами легких атмосферных ионов, являющихся носителями заряда в процессе тока проводимости в нижней атмосфере. Коэффициенты корреляции полярных электропроводностей с концентрацией аэрозольных частиц с диаметром менее 0,1 мкм достигают по данным ряда экспедиций последних лет 0,7-0,9. Начиная с 2017 года, экспедиции проводились в пунктах с низким содержанием радона-222 в приземном слое, как в степной, так и высокогорной зонах юга России, по причине особенностей ветрового режима в пунктах наблюдений. Поэтому влияние на вариации электропроводности такого мощного ионизатора, как радон-222, было ослаблено, и зависимость их от содержания аэрозолей превалировала. Она хорошо аппроксимировалась экспоненциальной функцией [1], и по результатам экспедиции в августе 2019 года на Кисловодской высокогорной научной станции Института физики атмосферы им.Обухова РАН (плато Шаджатмаз, 2100 м) были получены регрессионные зависимости:  $\lambda_+ = 27e^{-0,08N}$  ( $R^2=0,82$ )  $\lambda_- = 27e^{-0,12N}$  ( $R^2=0,89$ ). Ранее на Цимлянской научной станции ИФА РАН по сгруппированным данным для 2017 года получены теми же приборами аналогичные зависимости:  $\lambda_+ = 24e^{-0,16N}$  ( $R^2=0,96$ ) и  $\lambda_- = 18e^{-0,09N}$  ( $R^2=0,92$ ). Расчет выполнен для полярных электропроводностей  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$ , измеряемых в фСм/м, и концентрации аэрозолей  $N$  в  $10^8 \text{ м}^{-3}$ . По результатам экспедиции 2023 в степном Чернигово-Песчаном удалось получить некоторую не очень выразительную регрессию полярных электропроводностей по концентрации аэрозолей всех измеряемых размеров только для массива данных, полученных в периоды, когда ОА радона не превышала 30 Бк/м<sup>3</sup>:  $\lambda_+ = 18e^{-0,01N}$  ( $R^2=0,24$ )  $\lambda_- = 20e^{-0,04N}$  ( $R^2=0,36$ ). Более убедительно выглядит регрессия при таком же ограничении радона для самых мелких регистрируемых частиц с диаметром 0,1-0,2 мкм:  $\lambda_+ = 23e^{-0,10N}$  ( $R^2=0,72$ )  $\lambda_- = 25e^{-0,10N}$  ( $R^2=0,70$ ). Таким образом, в ситуации многофакторных процессов для получения убедительной регрессионной зависимости между величинами необходимы выборки, ограничивающие колебания фактора, выступающего в роли параметра.

Список публикаций:

[1]Болдырева В.А., Купинская А.И. // Материалы XXIV Всероссийской научной конференции студентов-физиков (ВНКСФ24). г.Томск, 2018. - С.392-393

## **Влияние метеоусловий и аэрозольного состояния приземной атмосферы на ток механического переноса из атмосферы на землю по данным наблюдений**

*Кондратьева Элина Романовна*

*Веселова Елизавета Юрьевна*

*Южный федеральный университет*

*Панчишкина Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.*

*[georgpu@rambler.ru](mailto:georgpu@rambler.ru)*

Приземный слой атмосферы представляет собой участок Глобальной электрической цепи, который характеризуется значительной электродинамической вариабельностью. Влияние на электрические процессы в приземной атмосфере оказывают состояние подстилающей поверхности, температурная стратификация, динамический режим, наличие аэрозолей и т.д. В комплексных геофизических экспедициях кафедры общей физики Южного федерального университета в летний период проведены многолетние измерения плотности вертикального тока механического переноса в пунктах с различными физико-географическими условиями.

Перенос зарядов под действием механических сил возникает в атмосфере в результате конвективного перемещения заряженных объемов воздуха и турбулентного перемешивания слоев с вертикальной неоднородностью плотности объемного заряда. На границе атмосфера-земля отсутствует конвективная составляющая плотности вертикального тока механического переноса, так как становится равной нулю скорость вертикальных потоков. Таким образом, заряд на земную поверхность попадает в результате диффузионных процессов различного масштаба.

В настоящей работе обсуждаются результаты экспедиционных измерений в пунктах Ростовской области и на плато Шаджатмаз (высота над уровнем моря 2100 м). В летний период в Ростовской области наблюдается интенсивная турбулентность, а ночью преобладает устойчивая стратификация, препятствующая вертикальному движению воздушных масс. Метеорологические условия периода измерений на плато Шаджатмаз являются типичными для высокогорья: высокая относительная влажность при сравнительно низкой температуре воздуха, слабо выраженный средний суточный ход скорости ветра и коэффициента турбулентности.

Для регистрации плотности тока механического переноса  $i_{мт}$  и метеорологических характеристик во всех пунктах использовался один и тот же комплекс измерений, он подробно описан в работе Петрова А.И. и др. [1]. С 2017 года производится регистрация концентрации аэрозолей субмикронного диапазона с помощью лазерного аэрозольного спектрометра ЛАС-П системы НИФХИ им. Л.Я. Карпова. Постоянство измерительного комплекса обеспечивает надежность результатов наблюдений с точки зрения сравнимости данных, полученных в разные годы и в разных пунктах наблюдений. Ниже (табл.) представлены средние значения плотности тока механического переноса и метеорологических характеристик, выбранных для периодов поступления на земную поверхность положительного и отрицательного заряда для пунктов Ростовской области

Пункт измерений	Знак заряда	Число серий измерений	Среднее значение $i_{мт}$ , пА/м <sup>2</sup>	Температура воздуха на высоте 2 м, °С	Скорость ветра на высоте 2 м, м/с	Коэффициент турбулентности, м <sup>2</sup> /с
Михайловка 1995-1998	положительный	26%	0,25	15,4	0,7	0,023
	отрицательный	74%	-0,73	17,2	1,4	0,041
Первомайское 1992-1994	положительный	49%	0,51	21,8	2,1	0,058
	отрицательный	51%	-0,52	23,8	2,2	0,074
Платов 2003	положительный	15%	0,35	13,2	0,2	0,005
	отрицательный	85%	-1,03	17,5	1,0	0,025

На основе анализа экспериментальных данных установлено, что ток механического переноса на границе атмосфера-земля для всех пунктов Ростовской области, кроме Цимлянска, имеет в среднем за период измерений отрицательное значение. В среднем за период наблюдений ток механического переноса на плато Шаджатмаз сообщает земной поверхности положительный заряд. Физико-статистический анализ результатов измерений показывает, что распределения значений плотности тока механического переноса во всех пунктах, имеют отрицательную (левостороннюю) асимметрию [2]. При этом в большей части часовых серий измерений в пунктах Ростовской области значения плотности тока механического переноса принимают отрицательные значения (см. табл. выше). С целью выяснения наиболее существенных факторов, влияющих на знак заряда, поступающего на земную поверхность под действием механических сил, сгруппированы отдельно массивы положительных и отрицательных значений плотности тока механического переноса и соответствующие им выборки метеорологических величин, отвечающих за термодинамическое состояние нижней атмосферы.

Обнаружено, что среднее значение плотности тока механического переноса для периодов поступления на земную поверхность отрицательного заряда во всех пунктах по модулю больше, чем в тех случаях, когда плотность тока механического переноса в среднем имеет положительное значение. Следует отметить, что выборочным массивам отрицательных значений плотности тока механического переноса соответствует более высокая температура воздуха, большая скорость ветра и соответственно более интенсивное перемешивание атмосферы, характеризуемое коэффициентом турбулентности (см. табл.).

Известно, что заряд, поступающий на поверхность земли под действием механических сил в основном связан с аэрозолями субмикронного диапазона [3], и можно видеть (см. табл. ниже), что большим по модулю значениями плотности тока механического переноса на плато Шаджатмаз соответствуют более высокие концентрации аэрозолей чем в Цимлянске. В таблице ниже приведены средние значения плотности тока механического переноса, концентрации аэрозолей, метеорологических характеристик, выбранных для периодов поступления на земную поверхность положительного и отрицательного заряда в Цимлянске и на плато Шаджатмаз.

Пункт измерений	Знак заряда	Число серий измерений	Среднее значение $i_{мт}$ , пА/м <sup>2</sup>	Температура воздуха на высоте 2 м, °С	Скорость ветра на высоте 2 м, м/с	Концентрация аэрозолей, см-3	
						диаметр 0,1-0,3 мкм	диаметр 0,4-0,7 мкм
Цимлянск 2017	положительный	71%	0,70	25,7	4,2	269	2,3
	отрицательный	29%	-1,02	32,5	6,1	290	1,5
Шаджатмаз 2018	положительный	76%	2,41	11,8	2,9	391	15,4
	отрицательный	24%	-3,11	13,0	3,2	419	15,1

Таким образом, термодинамический режим приземного слоя и содержание аэрозолей в атмосферном воздухе во всех пунктах измерений оказывает существенное влияние на вариации плотности тока механического переноса и знак заряда, поступающего под действием механических сил на земную поверхность.

Список публикаций:

- [1] Петров А.И. и др. // *Известия высших учебных заведений Сев.- Кав. рег., Естест.науки.* – 2010. – №3. – С. 47-52  
 [2] Панчишкина И.Н. и др. // *Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству – Санкт-Петербург: типография ВКА им. А.Ф.Можайского, 2023.* – с. 132-139.  
 [3] Петрова Г.Г. и др. // *IX Всероссийская научная конференция по атмосферному электричеству. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2023.* С. 140-147.

## Численное моделирование динамики пятен пассивной примеси в окрестности гайота в рамках трехслойной модели океана

**Шатохин Михаил Викторович**

*Институт водных проблем Российской академии наук*

*Соколовский Михаил Абрамович, д.ф.-м.н.*

*[usif-9694@mail.ru](mailto:usif-9694@mail.ru)*

К настоящему времени человечество столкнулось с тем, что развитие цивилизации неизбежно связано с непрерывным загрязнением океанов. Океан во многом определяет погоду и климат на планете. Поэтому проблема изучения распространения загрязнения морской среды выдвигается в разряд первоочередных.

Следуя [1], в рамках трехслойной квазигеострофической модели в приближении  $f$ -плоскости проводим исследование воздействия изолированного гайота (используются параметры гайота Затонского массива Магеллановых гор в центральной части Восточно-Мариинской котловины Тихого океана [2]) в океане на движение поверхностных, подповерхностных и глубинных пятен пассивной примеси, переносимых вертикально однородным зональным течением.

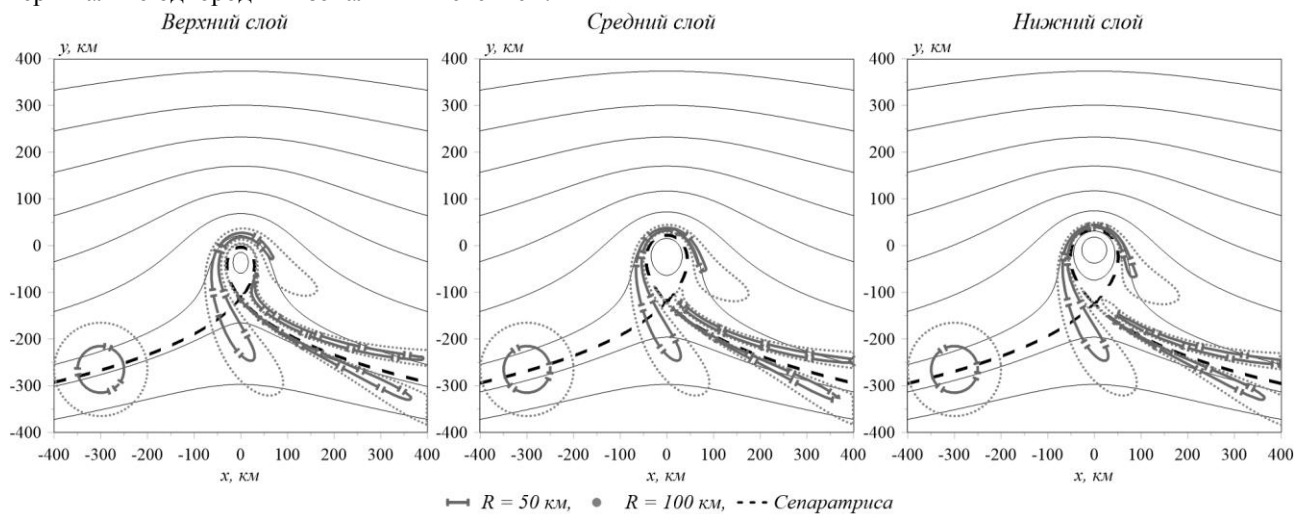


рис.1. Динамика пятен пассивной примеси в 3-х слоях

На рисунке 1 представлены результаты двух численных экспериментов в виде фазовых портретов, т.е. изолиний функций тока для верхнего, среднего и нижнего слоев (иначе, поверхностного, подповерхностного и глубинного слоев) с выделенными черным штрихом сепаратрисами и изображенных на их фоне мгновенных конфигураций контуров границ пятен пассивной примеси, когда центры первоначально круговых пятен расположены вблизи западного уса сепаратрисы на значительном расстоянии от возвышенности с центром в точке (0, 0), радиус пятен 50 км (первый эксперимент) и 100 км (второй эксперимент). Начальные положения центров поверхностного, подповерхностного и глубинного пятен находятся выше по потоку от возвышенности и несколько южнее сепаратрисы для верхнего, среднего и нижнего слоев в точке (-300, -275). При этом сепаратрисы делят пятна на неравные части: большая на юге и меньшая на севере, диспропорция для пятен меньшего размера больше. В обоих случаях пятна сносятся в восточном направлении и одновременно вытягиваются в продольном направлении таким образом, что большая/меньшая часть подвержена преимущественному воздействию течения ниже/выше сепаратрисы. При приближении к возвышенности вытягивание усиливается, далее верхняя часть пятна обходит петлю с севера, а нижняя с юга. Затем происходит окончательное разделение пятна на две части таким образом, что они обе продолжают продвигаться на восток

вдоль восточного уса сепаратрисы, прижимаясь к нему, но оставаясь по разные стороны от него. Численные расчеты (здесь не приведены) показывают, что воздействие топографии является максимальным в нижнем слое и минимальным в верхнем. Пятно меньшего размера гораздо сильнее подвергается влиянию топографии.

Описанные выше численные эксперименты демонстрируют, как изолированная возвышенность может влиять на распространение пятен примеси. Пятно пассивной примеси может быть интерпретировано, как любое скопление плавающих объектов, свободно дрейфующих в океане. К таким объектам, в частности, может относиться пластиковый мусор. Результаты работы могут быть использованы при объяснении особенностей распространения пластикового (и не только) мусора в окрестности подводной возвышенности.

Список публикаций:

[1] *Shatokhin M.V., Sokolovskiy M.A. Dynamics of Passive Admixture in Surface and Subsurface External Deformation Field above an Ocean Guyot. Moscow Univ. Phys. 78, 399-409 (2023)*

[2] <http://guyot.ocean.ru/baza-dannykh/gajot-zatonskogo.html>



## 14 - Статистическая механика жидкости, газа и плазмы. Молекулярная физика

Билокова Мария Романовна, 4 курс

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физический факультет

**Поверхностное натяжение раствора пропан-метан при температуре 328.15 К.**

Андбаева Валентина Николаевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [mishanabilukova17@gmail.com](mailto:mishanabilukova17@gmail.com) стр. 228

Каушан Полина Сергеевна, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, механико-математический факультет

**Изучение многофазных газожидкостных течений на водоочистных сооружениях**

Черевко Александр Александрович, к.ф.-м.н.

e-mail: [p.kaushan@g.nsu.ru](mailto:p.kaushan@g.nsu.ru) стр. 229



## Поверхностное натяжение раствора пропан–метан при температуре 328.15 К

Билукова Мария Романовна

Андбаева В.Н., Хотуенко М.Н.

Институт теплофизики УрО РАН

[mishanabilukova17@gmail.com](mailto:mishanabilukova17@gmail.com)

Отсутствие в литературе данных по поверхностному натяжению выдвигает на первый план проведение эксперимента и построение уравнений, работающих в широком диапазоне параметров состояний. Практическое применение исследуемой системы требует надежных данных о физико-химических свойствах и, в частности, о поверхностном натяжении, которое в существенной мере определяет протекание таких процессов как кипение, испарение и конденсация. В настоящей работе проведены измерения капиллярной постоянной и определены данные по поверхностному натяжению раствора пропан–метан при температуре 328.15 К.

Капиллярная постоянная  $a^2$  раствора пропан–метан измерена методом капиллярного поднятия. Опыты проведены при пяти различных значениях давления в системе (т.е. при разной концентрации метана в пропане). Давление не превышало 40 атм. В исследованном диапазоне параметров состояний капиллярная постоянная является полиномиальной функцией давления:

$$a^2 = a_0^2 + f(p),$$

где  $a_0^2$  – капиллярная постоянная чистого пропана [1];  $p_s$  – давление насыщения чистого пропана, равное 1,9072 МПа [2]. Функция  $f(p)$  получена в виде:

$$f(p) = \sum_{i=0}^3 f_i (p - p_s)^i, \quad (1)$$

$$\text{где } f_0 = 0,0003 \frac{\text{мм}^2}{\text{МПа}}, f_1 = -0,363 \frac{\text{мм}^2}{\text{МПа}}, f_2 = -0,058 \frac{\text{мм}^2}{\text{МПа}^2}, f_3 = 0,021 \frac{\text{мм}^2}{\text{МПа}^3}.$$

Поверхностное натяжение рассчитывалось по данным  $a^2$  и ортобарическим плотностям жидкой и газовой фаз, определённых по уравнению состояния раствора пропан–метан при температуре 328.15 К [2]

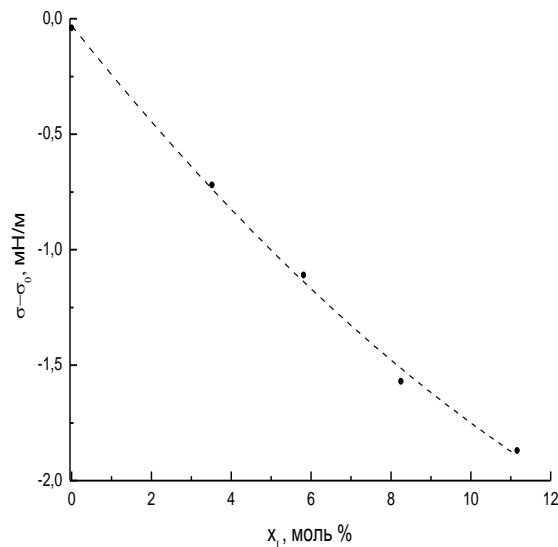


рис. 1. Концентрационная зависимость поверхностного натяжения при температуре 328.15. Пунктирная линия – расчет по ур. (2).

Из рис. 1. видно, что при росте концентрации пропана в растворе  $\sigma$  уменьшается. Поверхностное натяжение представляет собой полиномиальную функцию концентрации:

$$\sigma = \sigma_0 + s \cdot x, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – поверхностное натяжение чистого пропана [1]. Функция  $s(x)$  имеет вид:

$$s(x) = \sum_{i=0}^2 s_i x^i, \quad (3)$$

$$\text{где } s_0 = -0,029 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{моль}\%}, s_1 = -0,217 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{моль}\%}, s_2 = -0,029 \frac{\text{мН}}{\text{м} \cdot \text{моль}\%^2}.$$

В работе показано, что растворение метана в пропане приводит к уменьшению капиллярной постоянной и поверхностного натяжения чистого пропана. В дальнейшем планируется продолжение экспериментов для

получения поверхностного натяжения раствора в широком интервале температур и уточнение коэффициентов уравнения (2).

Список публикаций:

[1] Andbaeva V. N., Baidakov V. G. // *Fuel* 287, 119546 (2021)

[2] Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. *The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures*, 2007.

## **Изучение многофазных газожидкостных течений на очистных сооружениях**

**Каушан Полина Сергеевна**

*Новосибирский государственный университет*

*Черевко Александр Александрович*

*Карра Жан-Бастьен*

*[p.kaushan@g.nsu.ru](mailto:p.kaushan@g.nsu.ru)*

Исследования многофазных газожидкостных течений на очистных сооружениях имеет большое значение в современном мире, где сохранение экологической безопасности и защита окружающей среды становятся все более важными задачами. Двухфазные потоки являются основным рабочим телом в сооружениях очистки природных и сточных вод, в энергетических установках, аппаратах химической технологии. Подтверждением актуальности исследования является соавторство в Патенте № 2810577 «Способ предотвращения всплывания ила и пенообразование в очистных сооружениях».

Цель исследования состоит в разработке оптимального решения расположения труб подачи воздуха, при котором происходит наиболее эффективное насыщение воды кислородом, в целях повышения качества и скорости очистки воды.

Задача состоит в комплексном численном и экспериментальном изучении и оптимизации процессов, представляющих собой коллективное всплывание пузырьков воздуха, в условиях, моделирующих очистные сооружения. Применимость данной работы может быть найдена в области очистки вод на различных промышленных объектах, таких как нефтехимические заводы, электростанции, фармацевтические компании и т.д.

Численное моделирование производится в программе ANSYS CFX, используется модель двухфазного течения жидкости с пузырьками газа. Расчетная область представляет собой параллелепипед, вблизи дна которого происходит инжекция воздуха с заданным расходом либо давлением. На одной паре противоположных боковых стенках параллелепипеда заданы условия симметрии, а на другой паре — условия равенства нулю вектора скорости. Параллелепипед заполнен жидкостью до заданного уровня, а выше свободной поверхности — воздухом. На верхней стенке параллелепипеда заданы атмосферное давление и условие свободного протекания для воздуха.

Геометрические размеры и устройство экспериментальной установки соответствуют расчетной модели. Сравнение результатов эксперимента и численных расчетов обеспечивает корректность получаемых данных.

Критериями оптимизации процесса инжекции воздуха являются повышение насыщенности воды кислородом, и лучшее ее перемешивание.

Список публикаций:

[1] Павлов Н. Н., Иванова М. М. // *Исследование "Численное моделирование двухфазного течения в ANSYS CFX"*

[2] Иванов А. А., Петров Б. В. // *Статья "Многофазные потоки в системах очистки воды"*

[3] Смирнов Д. С., Козлова Е. И. // *Научная статья "Оптимизация процессов насыщения воды кислородом в очистных сооружениях"*

[4] Сидоров В. Г. // *Книга "Газожидкостные потоки в технике и технологии"*



**15 - Механика. Теоретическая механика. Механика жидкости, газа и плазмы.  
Инженерная механика**

Бердникова Анна Сергеевна, магистрант 1 года обучения  
Ижевск, Удмуртский государственный университет, институт математики, информационных технологий и физики

**Динамика роликового велосипеда**

Бизяев Иван Алексеевич, д.ф.-м.н.

e-mail: [bas.main78@gmail.com](mailto:bas.main78@gmail.com) стр. 233

Биганяков Арслан Азатович, 4 курс

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, Институт информатики, математики и робототехники

**Математическое моделирование взаимодействия волны давления в форме «ступенька» в трубе с жидкостью, содержащий сферический пузырьковый кластер**

Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.

e-mail: [madness.oldster@yandex.ru](mailto:madness.oldster@yandex.ru) стр. 234

Гареев Рафаэль Радикович, директор

Уфа, ООО РН-БашНИПИнефть, отдел механики

**Модель движения трассера в нефтяных низкопроницаемых пластах с трещиной автогидроразрыва**

Филиппов Александр Иванович, д.ф.-м.н.

e-mail: [garrafrad@mail.ru](mailto:garrafrad@mail.ru) стр. 235

Ильяшенко Антон Викторович, 3 курс

Томск, Томский государственный университет, физико-технический факультет

**Генерация объемных геометрических моделей структур армирования дисперсно-упрочненных материалов**

Сидоренко Юрий Николаевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [Aniu2018@mail.ru](mailto:Aniu2018@mail.ru) стр. 236

Ковальчук Татьяна Николаевна, аспирант 2 года обучения

Тюмень, Тюменский государственный университет, школа естественных наук

**Математическое моделирование процессов образования целиксов нефти**

Шевелёв Александр Павлович, к.ф.-м.н.

e-mail: [t.n.kovalchuk@mail.ru](mailto:t.n.kovalchuk@mail.ru) стр. 237

Кудряшова Светлана Алексеевна, 3 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Экспериментальное исследование асимметричной фокусировки внутренних волн в линейно стратифицированной жидкости**

Шмакова Наталья Дмитриевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [sonika.svetik2003@gmail.com](mailto:sonika.svetik2003@gmail.com) стр. 238

Рудая Яна Евгеньевна, магистрант 2 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, механико-математический факультет

**Исследование интегральных характеристик волновых аттракторов**

Шмакова Наталья Дмитриевна, к.ф.-м.н.

e-mail: [y.rudaya@gsu.ru](mailto:y.rudaya@gsu.ru) стр. 239

Сафиуллин Аскар Русланович, магистрант 1 года обучения

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, Институт информатики, институт математики и робототехники

**Отражение и прохождение акустических волн из пузырьковой жидкости в чистую под прямым углом**

Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.

e-mail: [safiullinak@mail.ru](mailto:safiullinak@mail.ru) стр. 240

Солнышкина Ольга Александровна, доцент, с.н.с.

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт

**Экспериментальные и вычислительные подходы к микрофлюидике для изучения процессов в нефтегазовой индустрии**

e-mail: [olgasolnyshkina@gmail.com](mailto:olgasolnyshkina@gmail.com) стр. 241

Фаттахов Салават Радикович, 1 курс

Уфа, Уфимский университет науки и технологий, ИИМРТ

**Исследование динамики волн давления в канале с пузырьковой завесой в форме шара**

Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.

e-mail: [salavat232001232001@mail.ru](mailto:salavat232001232001@mail.ru) стр. 242

## Динамика роликового велосипеда

**Бердникова Анна Сергеевна**

Уральский математический центр, Удмуртский государственный университет

Бизяев Иван Алексеевич, д.ф.-м.н.

[bas.main78@gmail.com](mailto:bas.main78@gmail.com)

Задача устойчивого движения велосипеда без велосипедиста была рассмотрена ранее в работах [1,2]. Опираясь на теоретические и экспериментальные модели, было показано, что для самостабилизации велосипеда не требуется гироскопическая прецессия переднего колеса и вынос руля. Аналогичная модель будет рассмотрена в данной работе.

В работе исследуется математическая модель, которая описывает движение по инерции роликового велосипеда на горизонтальной плоскости. Роликовый велосипед представляет связку двух тел (рама и руль), в которой каждое тело опирается на горизонтальную плоскость при помощи лезвия или ролика. На раме расположен ротор, который вращается вокруг оси симметрии с заданной постоянной скоростью.

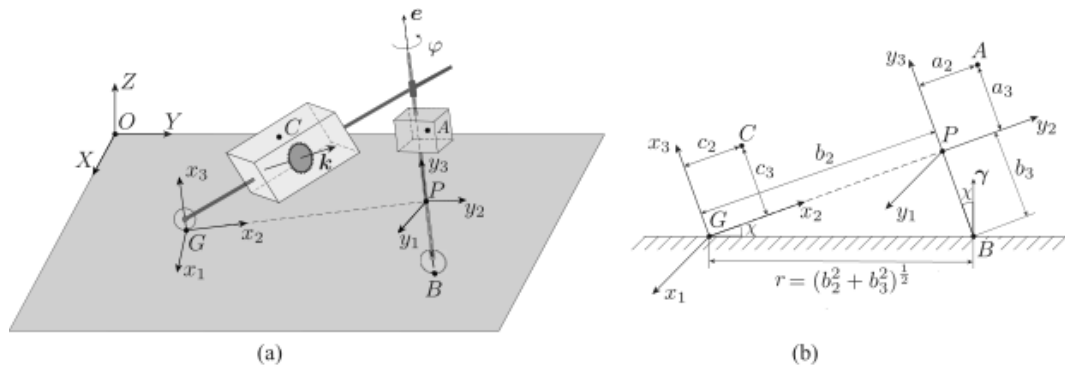


рис.1. (а) Схематическое изображение рассматриваемой конструкции велосипеда; (б) геометрические параметры велосипеда.

Движение велосипеда описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Уравнения, описывающие эволюцию конфигурационных переменных в неподвижной системе координат:

$$\dot{\varphi} = \Omega + \frac{b_3}{b_2} \omega_2 - \sin \varphi \frac{v}{b_2}, \quad \dot{\theta} = \frac{r}{b_2} \omega_2 - \sin \varphi \frac{b_3 v}{r b_2}, \quad \dot{\psi} = \frac{v \sin \varphi}{r \cos \theta},$$

$$\dot{X} = -v \frac{(r \cos \theta \cos \varphi + b_3 \sin \theta \sin \varphi) \sin \psi}{b_2 \cos \theta}, \quad \dot{Y} = v \frac{(r \cos \theta \cos \varphi + b_3 \sin \theta \sin \varphi) \cos \psi}{b_2 \cos \theta}, \quad (1)$$

где  $\varphi, \theta, \psi$  – углы характеризующие поворот руля, наклон рамы и поворот рамы в горизонтальной плоскости,  $X, Y$  – координаты точки контакта  $G$  лезвия с плоскостью.

Помимо уравнений (1) вводятся также дифференциальные уравнения для описания эволюции поступательной скорости точки контакта руля ( $\dot{v}$ ) и двух компонент угловой скорости ( $\dot{\omega}, \dot{\Omega}$ ). Среди восьми дифференциальных уравнений отделяется пятимерная редуцированная система  $(\dot{v}, \dot{\omega}, \dot{\Omega}, \dot{\varphi}, \dot{\theta})$ .

В работе проведен анализ устойчивости системы. Построены графики областей устойчивости для рассматриваемой задачи в зависимости от параметров велосипеда, для которого движение осуществляется по прямой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 21-71-10039).

Список публикаций:

[1] Meijaard J.P., Papadopoulos J. M., Ruina A., Schwab A. L. Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review, *Proceedings of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 2007, vol. 463, no. 2084, pp. 1955-1982.

[2] Kooijman J. D. G., Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., Schwab, A. L. A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects, *Science*, 2011, vol. 332, no. 6027, pp. 339-342.

# Математическое моделирование взаимодействия волны давления в форме “ступенька” в трубе с жидкостью, содержащий сферический пузырьковый кластер

Биганяков Арслан Азатович

Уфимский университет науки и технологий

Галимзянов Марат Назипович

[madness.oldster@yandex.ru](mailto:madness.oldster@yandex.ru)

Важность изучения динамики ударных волн в газожидкостных средах объясняется широким спектром практических задач: обеспечение пыле- и шумоподавления, пожара-взрывобезопасности технологических процессов, предупреждение загрязнений окружающей среды, защита зданий, сооружений, транспортных средств и людей от разрушительной силы ударной волны. В данной работе исследуется динамика волны давления в цилиндрическом канале, содержащем пузырьковую зону. Анализируется влияние размеров пузырьковой зоны, дисперсности и объемного содержания пузырьков на значения амплитуды волны давления, формирующейся из-за наличия пузырьковой зоны, воздействующего на стенки канала [1].

Пусть в цилиндрическом канале, заполненном жидкостью, расположена пузырьковая зона. В начальный момент времени  $t = 0$  на границе  $x = 0$  давление повышается мгновенно от начального значения  $p_0$  до  $p_0 + \Delta p_0$  и поддерживается таким в течение всего времени. Рассмотрим прохождение двумерных волн из пузырьковой жидкости в чистую. Схематично задача представлена на рисунке 1.

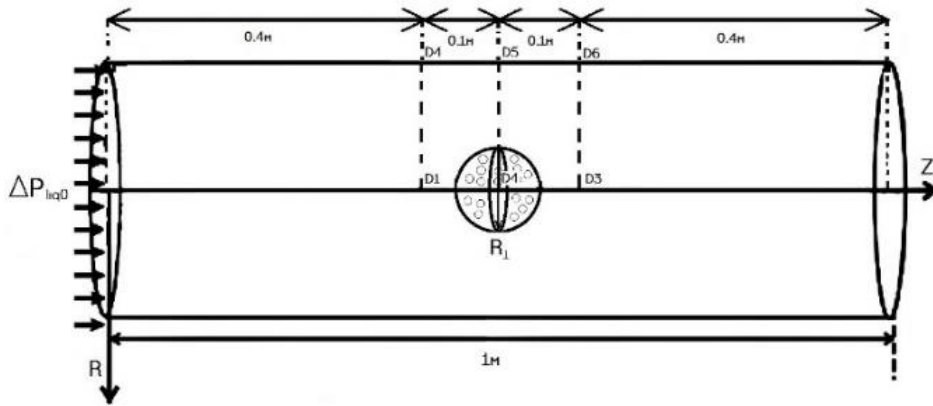


рис.1. Схематическое изображение задачи

Примем следующую систему уравнений, состоящую из приведенного закона сохранения массы [1], скорости радиального движения, уравнения Релея-Ламба, уравнения однородности давления, интенсивности межфазного теплообмена [2]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{v_r}{r} + \rho_i \left( \frac{dv_r}{dr} + \frac{dv_z}{dz} \right) = 0, \quad (i = liq, gas),$$

$$\rho_l^0 \frac{dv_r}{dt} + \frac{d\rho_l}{dr} = 0, \quad \rho_l^0 \frac{dv_z}{dt} + \frac{d\rho_l}{dz} = 0, \quad w = w_R + w_A,$$

$$a \frac{dw_R}{dt} + \frac{3}{2} w_R^2 + 4v_{liq} \frac{w_R}{a} = \frac{p_{gas} - p_{liq}}{\rho_{liq}^0}, \quad w_A = \frac{p_{gas} - p_{liq}}{\rho_{liq}^0 C_{liq} \alpha_g^{1/3}},$$

$$\frac{dp_{gas}}{dt} = -\frac{3\gamma p_{gas}}{a} w - 3 \frac{3(\gamma - 1)}{a} q, \quad q = \frac{\lambda_{gas} Nu (T_{gas} - T_0)}{2a}$$

где  $\rho_i^0$ ,  $\alpha_i$ ,  $v_i$  – плотность, объемное содержание и скорость  $i$ -й фазы, а нижний индекс (0) соответствует начальному состоянию,  $u$  и  $v$  – скорости среды,  $a$  – радиус пузырьков,  $C_l$  – скорость звука в жидкости,  $\alpha_0$  – объемное содержание пузырьков, температура жидкости  $T_0 = const$ .

На основе данных уравнений проведены численные расчеты максимальных значений давления в цилиндре. Результаты представлены на рисунке 2. Расчет до 1 мс, значение давления  $p_0 = 0.1$  МПа,  $\Delta p_0 = 0.5$  МПа, радиус пузырьков  $a_0 = 10^{-3}$  м, температура жидкости  $T_0 = 293$  К.

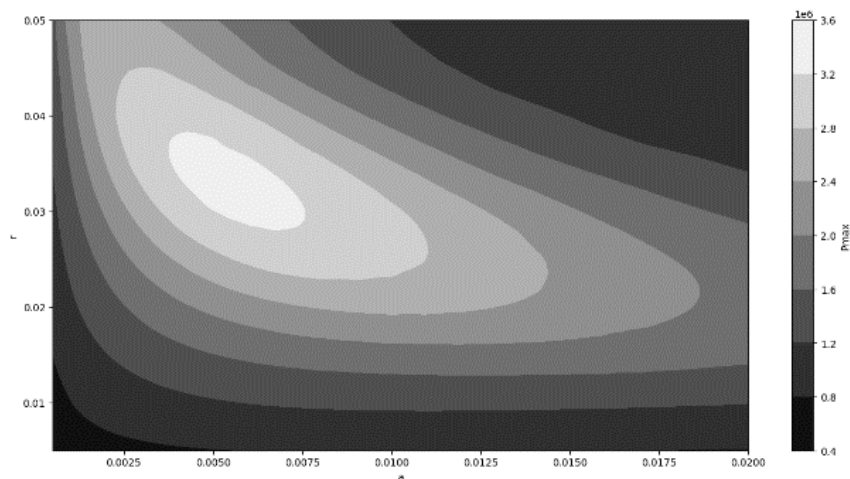


рис.2. Максимальные значения давления в цилиндре

Построена карта зон реализации максимального значения давления в канале от начального объемного содержания пузырьков и радиуса кластера. Видно, что существует (для выбранных начальных данных) оптимальная комбинация объемного содержания газа  $\alpha_{g0}$  и радиуса кластера  $R_1$ , при котором возможно увеличение начального значения амплитуды волны в несколько раз. Из рисунка 2 можно заключить, что с увеличением объемного содержания (правая часть рисунка), из-за понижения скорости распространения волны в пузырьковой области, снижается величина максимального давления в расчетной области.

Список публикаций:

- [1] Галимзянов М. Н., Гималтдинов И. К., Шагапов В. Ш. Двумерные волны давления в жидкости, содержащей пузырьки. Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2002. № 2. С. 139–147.  
 [2] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987, Т. 1, 2.

## Модель движения трассера в нефтяных низкопроницаемых пластах с трещиной автогидро разрыва

Гареев Рафаэль Радикович  
 ООО «РН-БашНИПИнефть»  
[gareevrr@bnipi.rosneft.ru](mailto:gareevrr@bnipi.rosneft.ru)

Разработка месторождений с низкопроницаемыми коллекторами сопровождается проведением гидро разрыва пласта в добывающих и нагнетательных скважинах. При этом в нагнетательных скважинах давление закачки, как правило, превышает давление разрыва пласта, соответственно, в нагнетательных скважинах происходит самопроизвольное развитие трещин автоГРП [1]. Развитие трещин в нагнетательных скважинах может привести к преждевременному обводнению добывающих скважин. Для контроля за развитием трещин автоГРП и поиска источников обводнения скважин на месторождениях в том числе проводятся трассерные исследования [2]. Растворение в технологических жидкостях, например, используемых при закачке пропантов в трещины гидро разрыва, особых добавок – трассеров и их последующая регистрация обеспечивает получение важной информации о процессах в пласте и скважине [3]. Преимуществом трассерных технологий является существенное увеличение глубинности исследований, которая для классических геофизических методов ограничена размерами порядка одного метра.

Развитие методов интерпретации результатов трассерных технологий сопряжено с необходимостью развития теоретических представлений, обеспечивающих описание эволюции метки трассера при ее движении в пласте с трещиной с учетом многообразия природных условий. В представляемой работе представлены некоторые теоретические результаты, достигнутые автором при исследовании взаимосвязи между микро- и макро моделями конвективно-диффузионных процессов при движении метки трассера в пласте с трещиной с учетом представлений о химическом равновесии в коллекторах [4,5].

Записанные уравнения представляют некоторую микро модель процессов в пористой среде. Это означает, что каждое из уравнений описывает процессы в отдельной области пространства. Проблема заключается в том, что микро структура этих областей имеет чрезвычайно сложную геометрию. Площадь контакта фаз в реальных пористых средах, содержащих нефть и газ, очень велика, размеры связанных пор малы, а их структура является



хаотической. Физические поля, описывающие процессы в таких средах, обладает большой пространственной неоднородностью. Например, поле скорости сильно меняется по сечению пор, а в соседних точках, представляющих скелет, вектор скорости равен нулю.

Уравнение конвективной диффузии можно представить как

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( (1-m) \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_w} + m \right) \rho_w \right] + \nabla (\rho_w \vec{v}) - \nabla \vec{J}_d = \\ = -\alpha [(1-m)\rho_s + m\rho_w],$$

где  $\vec{J}_d = \vec{J}_s + \vec{J}_{wd} = \left( D_s(1-m) \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_w} + D_w m \right) \nabla \rho_w$ .

Отсюда следует выражения для эффективного коэффициента диффузии

$$D_d = D_s(1-m) \frac{\partial \rho_s}{\partial \rho_w} + D_w m.$$

Извилистость пор приводит к возникновению встречных к основному потоку течений, что сродни хаотическому движению молекул, инициирующему молекулярную диффузию  $D_d$ . Априори наличие встречных течений должно приводить к генерации дополнительного потока трассера, а соответствующий процесс называется конвективной диффузией. Показано, что коэффициент конвективной диффузии  $D_c$  является аддитивным к молекулярному  $D_d$ , а результирующий коэффициент представляется как  $D = D_c + D_d$ .

С учетом этой поправки представленные здесь уравнения позволяют с достаточной для практических целей описывать пространственно-временные зависимости полей концентрации трассера в пористой среде и трещинах гидроразрыва.

Список публикаций:

- [14] Мальцев В. В., Асмандияров Р. Н., Байков В. А., Усманов Т. С., Давлетбаев А.Я. Исследование развития трещин автоГРП на опытном участке Приобского месторождения с линейной системой разработки // Нефтяное хозяйство. - 2012. - № 5. - С. 70-73
- [15] Мирзаянов А.А., Асалхузина Г.Ф., Питюк Ю.А., Валева Ю.Р., Альмухаметова А.Р., Гареев Р.Р., Давлетбаев А.Я., Мирошниченко В.П., Гусев Г.П. Матрицы применимости трассерных исследований на примере элемента девятиточечной системы разработки с трещинами гидроразрыва // Нефтегазовое дело. 2021, т. 19, № 4 С. 41-49. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-4-41-49
- [16] Бикметова А.Р., Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Штинов В.А., Макеев Г.А., Мирошниченко В.П., Шутский Г.А., Сергейчев А.В. Оценка параметров трещин в горизонтальных скважинах с многостадийным гидроразрывом пласта путем настройки гидродинамической модели на результаты трассерных исследований // Нефтяное хозяйство. 2022. № 11. С. 118-121.
- [17] Filippov A.I., Mikhaylov P.N., Mikhaylov A.P., etc. Mass Transfer – Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling. Croatia: In Tech, 2013. – 511 pp.
- [18] Филиппов А.И. Основы теории переноса радиоактивных растворов в пористой среде Стерлитамак. Уфа: Гилем, 2016. – 220 с.

## Генерация объемных геометрических моделей структур армирования дисперсно-упрочненных материалов

**Ильяшенко Антон Викторович**

Томский государственный университет

Сидоренко Юрий Николаевич

[anuu2018@mail.ru](mailto:anuu2018@mail.ru)

В настоящее время широко используются армированные материалы. Использование данных материалов требует разработки способов их проектирования и создания. При этом нужно учитывать факторы влияющие на их свойства. Одним из важных факторов является структура армирования материалов.

Для изучения влияния структур армирования необходимы инструменты для генерации и изучения таких структур. В работе рассматривается методика генерация объемных геометрических моделей структур армирования дисперсно-упрочненных материалов. В данной работе применяется один из простых методов генерации — заполнение объема элементами структуры шарообразной формы. Методика позволяет задать такие параметры как величина объемного наполнения, степень упорядоченности размещения включений и так далее.

Проделанная работа позволяет оценить скорость генерации при разных типах армирования и степенях наполнения. Показано что при генерации регулярных структур эффективность предложенной методики намного выше, чем при генерации нерегулярных структур, особенно при высоких степенях наполнения материала армирующими включениями.

Список публикаций:

[1] *Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях.* / Б.А. Люшкин, А. В. Герасимов, Р. А. Крестулева, П. А. Люшкин - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. -С. 272.

[2] Сидоренко Ю.Н. *Исследование условий накопления микроповреждений и биокompозите на основе пористого титана* /Ю.Н. Сидоренко, Вознюк Ю.П. // *Физическая мезомеханика.* - 2001. Т.4, №2. -С. 37 - 41.

## Математическое моделирование процессов образования целиков нефти

**Ковальчук Татьяна Николаевна**

*Гильманов Александр Янович, Шевелёв Александр Павлович*

*Тюменский государственный университет*

*Шевелёв Александр Павлович*

*t.n.kovalchuk@mail.ru*

В настоящее время является актуальной проблема образования значительных зон не вытесненной нефти (целиков). Определение местоположения целиков либо условий, при которых они не будут образовываться является важной задачей [1]. Поэтому целью работы является разработать методики для определения местоположения целиков остаточной нефти в пласте, и определения минимальной депрессии, при которой не происходит образования целиков при данных характеристиках пласта в случае выполнения закона Дарси. Так же следует проанализировать необходимость учета при моделировании сжимаемости, различия в давлениях воды и нефти, то есть капиллярного давления.

В работе рассматривается плоскорадиальное фильтрационное течение упругой вязкопластичной жидкости в упругой пористой среде с постоянным дебитом  $Q$ . Учитывается, что практически сразу после пуска скважины радиус возмущенной зоны много больше его значения при начальных условиях, т.е. радиуса скважины  $r_c$ . В рамках такой модели реализуется зависимость депрессии на пласт  $\Delta p$  от дебита скважины  $Q$  вида:

$$\Delta p = \frac{Q\eta}{6\pi kh} \ln \frac{3Q\eta\alpha t}{\pi kh\gamma r_c^2} + \gamma \left( \frac{3Q\eta\alpha t}{\pi kh\gamma} \right)^{1/3} - \frac{Q\eta}{2\pi kh} \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости,  $h$  – постоянная мощность пласта,  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости,  $\alpha = \frac{k}{\eta\beta^*}$  – коэффициент пьезопроводности,  $\beta^*$  – коэффициент упругоёмкости (сжимаемости) пласта,  $\gamma$  – предельный градиент давления,  $t$  – время.

После применения пи-теоремы для обезразмеривания уравнение (1) будет иметь следующий вид:

$$p^* = A \ln(ABDQ^*) + (ABCDQ^*)^{1/3} - 3AQ^*$$

где  $A, B, C, D$  – безразмерные коэффициенты,  $p^*$  и  $Q^*$  – безразмерные депрессия и дебит соответственно.

Для определения местоположения целиков нефти используется система законов сохранения, а также уравнения для капиллярного давления и сжимаемости породы.

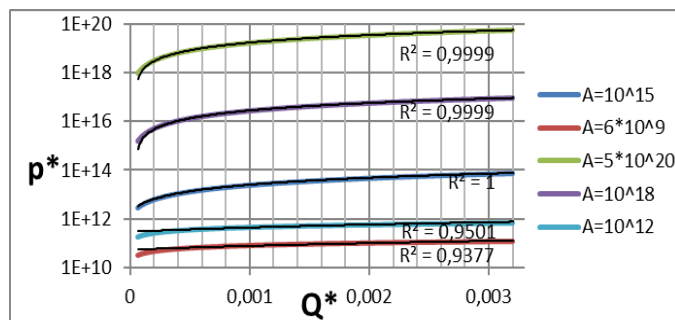


рис.1. Зависимость безразмерной депрессии от безразмерного дебита. Индикаторная диаграмма в полулогарифмическом масштабе. Получение линейной зависимости при изменении безразмерного коэффициента  $A$ .

В результате с учётом капиллярного давления и сжимаемости породы были рассчитаны проекции скоростей фильтрации нефти, в местах, где скорость нефти равна нулю и образуются области не вытесненной нефти. Также были построены индикаторные диаграммы для определения минимальной депрессии при которой образования целиков происходить не будет. На *рис. 1.* приведен пример индикаторной диаграммы в полулогарифмическом масштабе для определения минимальной депрессии.

Таким образом, капиллярное давление и сжимаемость породы являются одними из основных параметров, которые в значительной степени влияют на получаемый прогнозный вариант, определены минимальные депрессии при которых целики нефти не образуются.

Список публикаций:

[1] Mandal D. An Innovative Reservoir Engineering Method to Identify Bypassed Oil and Derisk the Further Development of a Complex Mature Field in Offshore, Malaysia / D. Mandal, N. Musani, and N. I. Mohmad // International Petroleum Technology Conference. – 2019. – Paper IPTC-19182-MS– 16 pp.

## Экспериментальное исследование асимметричной фокусировки внутренних волн в линейно стратифицированной жидкости

*Кудряшова Светлана Алексеевна*

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН*

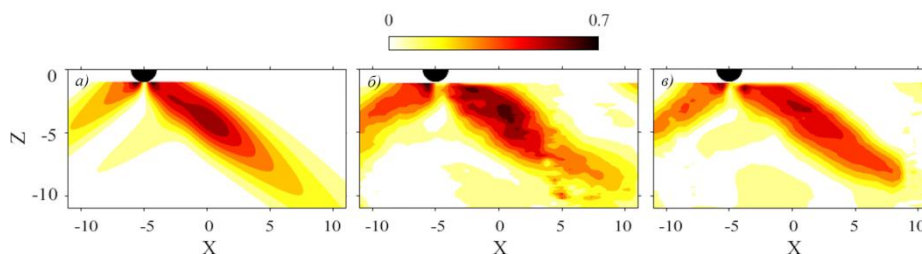
*Шмакова Наталья Дмитриевна, к.ф.-м.н.*

*[s.kudryashova@g.nsu.ru](mailto:s.kudryashova@g.nsu.ru)*

Опрокидывание внутренних волн, как известно, является распространенным в мировом океане механизмом перешивления стратификации, происходящим в результате влияния специфического рельефа океанического дна на характер течения. В процессе взаимодействия внутреннего прилива с особым рельефом возникает зона фокусировки, геометрически определяемая область пространства, где амплитуда внутренней волны увеличивается в 2 раза. Подобные явления наблюдаются в норвежских фьордах и кратерах, оставленных метеоритами на дне океана. В лабораторных условиях воспроизвести аналогичную волновую картину возможно, выполнив переход в систему отсчета, где жидкость покоится, а течение создает осциллирующий объект – тор, выполненный в своей асимметричной конфигурации. Теоретическое моделирование данной волновой картины уже достаточно хорошо изучено и согласуется с ранее проводившимися экспериментами.

Целью данного исследования является изучение характеристик полей внутренних волн, генерируемых горизонтальными колебаниями асимметричного тора, моделирующего искривленный горный хребет. Эксперименты были проведены в резервуаре из оргстекла, заполненном линейно стратифицированной жидкостью. Осциллирующий тор был погружен в воду и приводился в движения с помощью специальной колебательной системы. Регистрация данных происходила с использованием метода PIV в двух вариантах постановки: с плоскостью лазерного ножа, параллельной плоскости колебаний тора (вертикальной), и перпендикулярной ей, находящейся на глубине зоны фокусировки.

Показано, что экспериментально полученные данные качественно совпадают с теоретической моделью асимметричной фокусировки: структура поля скоростей внутренних волн имеет хорошо согласованный с теорией вид. Были сделаны расчеты среднего течения в зоне фокусировки. Наблюдается горизонтальный средний поток, распространяющийся из зоны фокусировки в направлении от сегмента тора.



*рис.1. Амплитуда вертикальной скорости внутренних волн, генерируемых асимметричной частью тора, а) теория, б) амплитуда колебания 2,5 мм, в) амплитуда колебания 7,15 мм.*

## Исследование интегральных характеристик волновых аттракторов

Рудая Яна Евгеньевна

Шмакова Наталья Дмитриевна, Макридин Захар Владимирович, Ерманюк Евгений Валерьевич

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

Шмакова Наталья Дмитриевна, к.ф.-м.н., Ерманюк Евгений Валерьевич, д.ф.-м.н.

[y.rudaya@g.nsu.ru](mailto:y.rudaya@g.nsu.ru)

Изучение баланса энергии в динамике стратифицированной жидкости позволяет отследить переток энергии с больших масштабов, на которых происходит нагнетание, до малых, где имеет место диссипация. В случае, когда область течения замкнута, а нагнетание происходит за счет движений малой амплитуды, за поток энергии отвечают пограничные слои и поле генерируемых внутренних волн.

В данной работе исследуются внутренние волны в трапециевидной геометрии, генерируемые колебаниями вертикальной пластины. В такой постановке ввиду специфического дисперсионного соотношения, волны фокусируются, отражаясь от наклонной поверхности, а волновая энергия концентрируется на волновом аттракторе.

Экспериментальные оценки величин, участвующих в таком процессе, затруднительны: для измерения мощности в системе необходимо знать поля скорости и давления в каждой точке подвижной границы. В работе Davis et al. (2019) использовался полуаналитический метод, а именно, поле скорости измерялось при помощи метода PIV в центральной вертикальной плоскости, перпендикулярной волнопродуктору. Далее, используя измеренное поле скорости, восстанавливается градиент давления из линеаризованных уравнений Эйлера, который, в свою очередь, интегрируется в пакете Matlab. Показано, что описанная процедура позволяет достаточно точно оценить баланс энергии только в линейном случае. В связи с этим в рамках данной работы выполнена оценка нагнетаемой мощности при помощи следующих подходов: прямое двумерное численное моделирование с помощью пакета Nek5000, измерения мощности с помощью датчиков угловых колебаний и датчика линейных перемещений, закрепленных на волнопродукторе, а также описанный выше полуаналитический метод.

Графики мощности, полученной тремя описанными выше способами, показаны на рис. 1. Отмечается удовлетворительное соответствие между тремя методами. Данные, полученные при помощи двумерного моделирования, завышены ввиду трехмерности области и отсутствия в оценках диссипации на боковых стенках. Нагнетаемая в систему мощность на пластине выше, чем на некотором расстоянии от пластины. Сопоставление экспериментальных и численных данных удовлетворительное. Наблюдается ошибка порядка 10%, в целом метод, предложенный в Davis et al. (2019) работает.

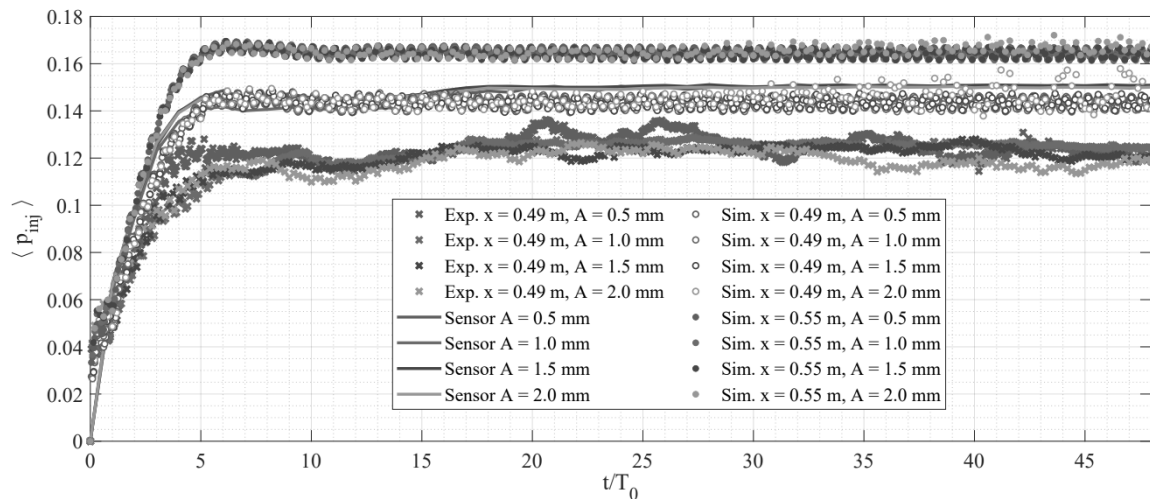


рис.1. Зависимость усредненной нагнетаемой в систему мощности от времени, посчитанной тремя способами: из численных расчетов на расстоянии 0.06 мм от пластины (полые круги) и на пластине (закрашенные круги), из экспериментальных данных (кресты) и из данных с датчиков, установленных на пластине (линии), на разных амплитудах, показанных разными оттенками серого: 0.5 мм, 1 мм, 1.5 мм и 2 мм.

## Отражение и прохождение акустических волн из пузырьковой жидкости в чистую под прямым углом

**Сафиуллин Аскар Русланович**

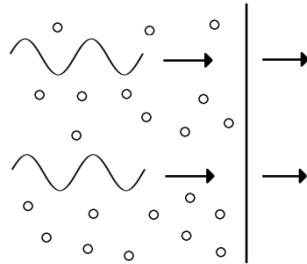
*Уфимский университет науки и технологий*

*Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.*

[safiullinak@mail.ru](mailto:safiullinak@mail.ru)

Из литературы известно, что физико-химические свойства жидкостей в метастабильном состоянии в основном определяются наличием в их составе различных включений, например газовых пузырьков или твердых частиц [1]. В данном случае рассмотрены особенности распространения звука на границе из пузырьковой жидкости, содержащей газы зародыши, в чистую, при падении под прямым углом.

Пусть в жидкости, находящейся при температуре  $T_0$  и при давлении  $p_0$ , имеются сферические пузырьки радиусом  $a_0$ , которые содержат пар и нерастворимый в жидкой фазе газ. Объемное содержание пузырьков фиксировано  $\alpha_0$ . Рассмотрим прохождение двумерных акустических волн из пузырьковой жидкости в чистую. Схематично задача представлена на *рисунке 1*.



*рис.1. Схематическое изображение задачи*

Для описания свойств акустических волн примем следующую систему уравнений, состоящую из приведенного закона сохранения массы, уравнений импульсов, уравнения Рэлея-Ламба, уравнения теплопроводности и диффузии [2]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_l^2} \frac{\partial p_l}{\partial t} + \rho_{l0}^0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - 3\rho_{l0}^0 \frac{\alpha_0}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} &= 0, \\ \rho_{l0}^0 \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \quad \rho_{l0}^0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p_l}{\partial y} &= 0, \\ \rho_{l0}^0 a_0 \frac{\partial^2 a}{\partial t^2} + 4 \frac{\rho_{l0}^0 v_l^\mu}{a_0} \frac{\partial a}{\partial t} &= p_g - p_l + \frac{2\sigma}{a_0} a, \\ \rho_{l0}^0 c_g \frac{\partial T_g'}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_g r^2 \frac{\partial T_g'}{\partial r} \right) + \frac{\partial P_g}{\partial t}, \quad \frac{\partial k'}{\partial t} &= \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial k'}{\partial r}, \end{aligned}$$

где индексы  $i = l, v, a$  относятся к параметрам жидкости, пара и газа, а нижний индекс (0) соответствует начальному состоянию,  $u$  и  $v$  – скорости среды,  $a$  – радиус пузырьков,  $C_l$  – скорость звука в жидкости,  $\alpha_0$  – объемное содержание пузырьков,  $v_l^\mu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $D$  – коэффициент диффузии.

Для пузырьковой жидкости, описанной выше, определены [3] коэффициенты преломления и отражения волн:

$$S = 2 / \left( 1 + \frac{\omega}{K C_l} \right), \quad R = S - 1, \tag{1}$$

где  $\omega$  – частота возмущений,  $K$  – волновой вектор.

На основе данных уравнений проведены численные расчеты коэффициентов отражения и преломления. Результаты представлены на *рисунке 2*. Обозначениям 1, 2, 3 соответствуют значения температур  $T_0 = 300, 353$  и  $373$  К. Сплошные линии обозначают модуль представляемого коэффициента, а штриховые – его аргумент, так как получаемое число является комплексным. Значения объемного содержания  $\alpha_0 = 10^{-3}$ , радиус пузырьков  $a_0 = 10^{-3}$  м.

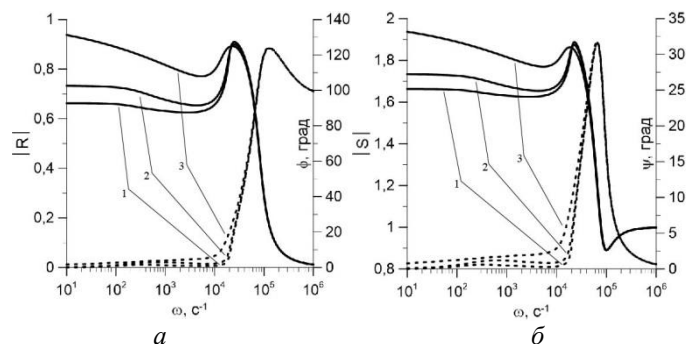


рис.2. Модули и аргументы коэффициентов отражения (а) и преломления (б)

Для простоты понимания результатов, каждый график можно условно разделить на две части: до миннаэрттовой частоты [3] (собственная частота колебаний пузырьков)  $\omega_R$  и после. До этой частоты графики отличаются, а после нее сливаются в один. Видно, что коэффициент отражения в высокочастотной области стремится к нулю, а коэффициент преломления к единице. То есть в высокочастотной области колебания практически не отражаются. В низкочастотной области  $\omega < \omega_R$  волна отражается в достаточно высокой степени ( $|R| > 0.6$ ) и проходит в чистую жидкость с увеличенной силой ( $|S| > 1.6$ ). При этом влияет заданная температура: чем она выше, тем больше коэффициенты отражения и преломления. Это связано с фазовыми переходами: при повышении температуры повышается массовая доля пара в пузырьках, и их влияние на колебания усиливается.

Список публикаций:

- [19] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987, Т. 1, 2.  
 [20] Особенности распространения звука в теплой воде с воздушными пузырьками / В. Ш. Шагапов, М. Н. Галимзянов, И. И. Вдовенко, Н. С. Хабеев // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 4. – С. 912-921.  
 [21] Шагапов, В. Ш. Особенности отражения и прохождения акустических волн на границе "чистой" и пузырьковой жидкостей при прямом их падении / В. Ш. Шагапов, М. Н. Галимзянов, И. И. Вдовенко // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 2. – С. 284-290.

## Экспериментальные и вычислительные подходы к микрофлюидике для изучения процессов в нефтегазовой индустрии

**Солнышкина Ольга Александровна**

Уфимский университет науки и технологий

[olgasolnyshkina@gmail.com](mailto:olgasolnyshkina@gmail.com)

Одно из активно развиваемых в последние десятилетия приложений микрофлюидики - конструирование систем диагностики на базе "лабораторий-на-чипе" ("lab-on-a-chip") для проведения точных манипуляций с частицами в потоке, таких как фокусировка, разделение и фракционирование для использования в биофизике, медицине, биохимии и других технологических приложениях. Использование микрочипов обусловлено целым рядом преимуществ по сравнению с классическим способом проведения лабораторной диагностики. Среди них: интегрируемость - возможность совместить в рамках одного устройства несколько этапов обработки образцов; миниатюрность - меньшее количество используемых реагентов и образцов, меньшее время процесса; автоматизация - снижение возможных ошибок вследствие человеческого фактора. Интеграция в микрофлюидные устройства (МФУ) специальных функциональных элементов позволяет создавать новые аналитические системы, платформы и приборы с уникальными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Микрофлюидные платформы также являются удобным и привлекательным инструментом для изучения процессов извлечения нефти из горных пород в связи со сходным диапазоном размера пор и микроканалов. Наиболее значимыми для изучения явлениями являются изменение смачиваемости, уменьшение межфазного натяжения, изменение коэффициента подвижности, стабилизация нагнетаемой жидкости, деградация, набухание, адсорбция, закупорка канала, закупорка, отклонение жидкости и эмульгирование. Для прогнозирования поведения пластовых жидкостей в пористой среде и их исследования на макроуровне необходимо детальное изучение гидродинамических потоков в пористой среде в микромасштабе на уровне отдельных поровых пространств, принимая во внимание их структурные особенности.

Предложены подходы для экспериментального и численного изучения особенностей течения жидкости и дисперсных систем в системах микроканалов. Представлены результаты экспериментального изучения

процессов вытеснения в различных микромоделях пористых сред с использованием МФУ, разработаны подходы к созданию микрофлюидных чипов из стекла и полидиметилсилоксана. Рассмотрены особенности ускорения численного подхода на основе метода граничных элементов, как с использованием алгоритмического ускорения (масштабируемый быстрый метод мультиполей), так и с применением гетерогенных вычислительных архитектур. Продемонстрированы возможности численного моделирования течений в микроканалах совместно с экспериментальным изучением с использованием микромоделей пористых сред различной конфигурации и технологий микрофлюидики.

Реализованные технологические подходы к созданию функциональных систем “lab-on-a-chip” с контролируемой смачиваемостью и способами управления потоками за счет изменения внутренней структуры микроканалов и свойств поверхностей применимы при создании газоаналитических и биоаналитических мультисенсорных систем, а также разработанные макеты микрофлюидных систем могут служить основой платформ для проведения скрининг-тестов в нефтегазовой промышленности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФ в рамках научного проекта № 21-79-10212.

## Исследование динамики волн давления в канале с пузырьковой завесой в форме шара

**Фаттахов Салават Радикович**

*Уфимский университет науки и технологий*

*Галимзянов Марат Назипович, к.ф.-м.н.*

*[Salavat232001232001@mail.ru](mailto:Salavat232001232001@mail.ru)*

Особенности распространения волн в пузырьковой жидкости связаны с совокупным взаимодействием нелинейных, дисперсионных и диссипативных эффектов. В жидкости с пузырьками свойства практически несжимаемой жидкости, являющейся несущей фазой, кардинально меняются при небольшом по объему (а тем более по массе) добавлении газа (пузырьков), являющегося дисперсной фазой. Особенность пузырьковой жидкости обусловлена их высокой статической сжимаемостью при сохранении высокой плотности, близкой к плотности жидкости, что в свою очередь приводит к малой равновесной скорости звука. Интересной особенностью пузырьковой жидкости в динамических процессах является проявление инерции жидкости при изменении объема смеси за счет сжатия или расширения пузырьков [1]. К настоящему времени одномерные волны в пузырьковой жидкости хорошо изучены [1–3] и на данный момент активно исследуются двумерные волны. Одной из интереснейших задач волновой динамики пузырьковой жидкости, в которой ярко проявляются многомерные эффекты, является взаимодействие ударной волны с пузырьковым кластером в жидкости.

Пусть в канале, заполненном жидкостью, находится прилегающая к одному из торцевых границ канала пузырьковая зона в форме сферы (Рис.1). Рассмотрим двумерные волновые возмущения. Такая ситуация может реализоваться, например, при воздействии на систему граничным давлением ( $p = p^0(r, t)$  при  $z = z_0$ , где  $R_{cl}$  – характерный радиус пузырьковой области,  $R_c$  – радиус канала,  $L_c$  – длина канала,  $\Delta P_0$  – амплитуда волны давления).

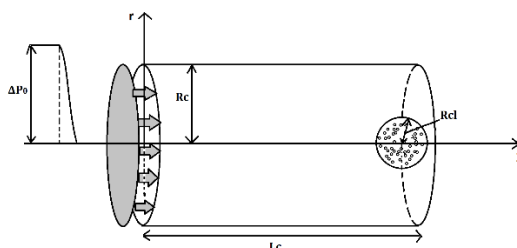


рис.1. Схематическое изображение расчетной области

Для описания движения пузырьковой жидкости при обычных для таких систем допущениях примем систему, состоящую из уравнений масс, числа пузырьков, импульсов и давления в пузырьках в односкоростном приближении [1]:

$$\frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (i = l, g), \quad \frac{dn}{dt} + n \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \quad \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial x} = 0, \quad \rho \frac{dv}{dt} + \frac{\partial p_l}{\partial y} = 0, \quad \rho = \rho_g + \rho_l,$$

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3\gamma p_g}{a} w - \frac{3(\gamma-1)}{a_0} q, \quad w = \frac{da}{dt}, \quad \left( \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right), \quad \alpha_l + \alpha_g = 1, \quad \rho_i = \rho_i^0 \alpha_i, \quad \alpha_g = \frac{4}{3} \pi n a^3,$$

где  $a$  – радиус пузырьков,  $p_i$  – давления фаз,  $q$  – интенсивность теплообмена,  $n$  – число пузырьков в единице объема,  $w$  – радиальная скорость пузырьков,  $\rho_i^0$  – истинные плотности фаз,  $\gamma$  – показатель адиабаты для газа,  $\alpha_i$  – объемные содержания фаз. Скорости  $u$  и  $v$  соответствуют движению по координатам  $x$  и  $y$ . Нижними индексами  $i=l, g$  отмечены параметры жидкой и газовой фаз.

Результаты численных расчётов представлены на *рисунках 2 и 3*. Было рассмотрено влияние величины начального импульса на максимальное давление, которое возникает в разных сферических кластерах. Сперва был зафиксирован радиус канала  $R_c = 0.05$  м. и варьировалось объемное содержание пузырьков в кластере  $\alpha_i = (0.001, 0.01, 0.02, 0.03)$  это рисунок 2. Далее было зафиксировано уже объемное содержание  $\alpha_i = 0.01$  и варьировался радиус канала  $R_c = (0.025, 0.05, 0.075)$  м это рисунок 3.

На рисунке 2 представлены расчеты при форсированном радиусе  $r = 0.05$  м. Из рисунка 2 можно сделать вывод, что для объемного содержания пузырьков  $\alpha_i = 0.001$  основную роль в кумуляции волнового импульса играет геометрия пузырькового кластера и увеличение давления имеет линейный вид. При этом для случая пузырьковых областей с объемным содержанием 0.01-0.03 видно, что в системе фиксируются большие значения давления. Это можно связать с более длительным временем, потраченным на достижение фронтом волны середины завесы, из-за низкой скорости волны в пузырьковой области для данных объемных содержаний. Так же можно заметить, что при давлении до 10 атмосфер нет существенной разницы какое объемное содержание использовать при данном радиусе пузырьковой завесы.

На рисунке 3 представлены расчеты при форсированном начальном объемном содержании пузырьков  $\alpha_i = 0.01$ . Можно заметить некое разделение графика на две части: до 10 атмосфер и после. Можно сделать следующий вывод: для достижения более высоких давлений при известном значении начальной амплитуды волны до 10 атмосфер лучше использовать небольшие завесы с маленьким объемным содержанием, например, 0.001. В случае же более сильных волн, например, с амплитудой свыше 10 атмосфер, лучше использовать завесы с большим радиусом и большим объемным содержанием.

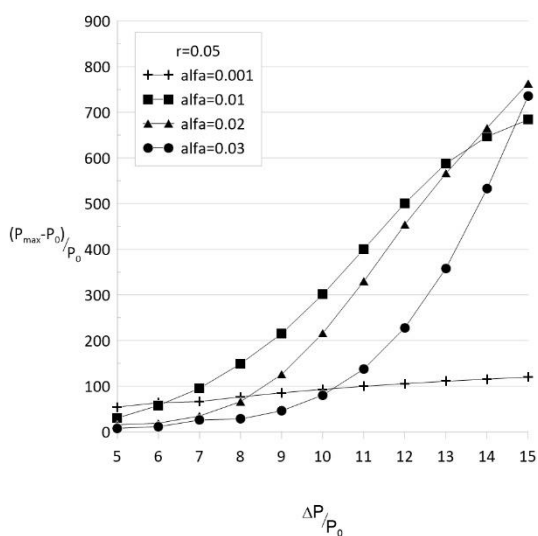


рис. 2. Зависимость максимального давления от силы начального импульса при разных объемных содержаниях.

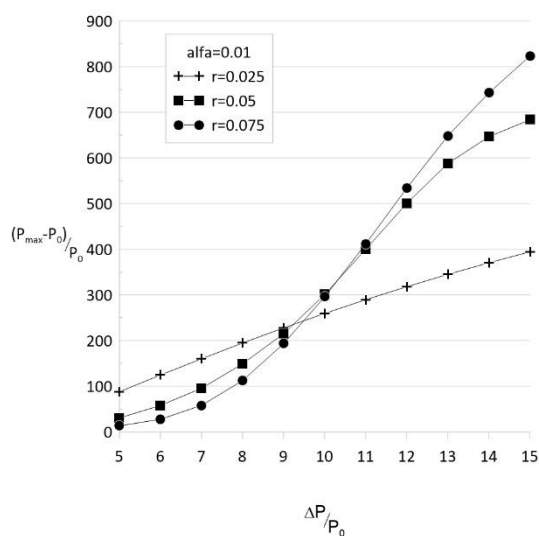


рис. 3. Зависимость максимального давления от силы начального импульса при разных радиусах пузырьковой завесы.

Список публикаций:

[1] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987, Т. 1,2.  
 [2] Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.  
 [3] Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с: ил.





## 16 - Материаловедение. Физика кристаллов. Наноматериалы и композиты

Артишевский Кирилл Витальевич, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Исследование влияния графенового покрытия на смачиваемость поверхностей методом молекулярной динамики**

Андрющенко Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [k.artishevskii@g.nsu.ru](mailto:k.artishevskii@g.nsu.ru) стр. 247

Бетке Игорь Андреевич, 2 курс

Новосибирск, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, физический факультет

**Влияние высыхающих капель на проводящие характеристики графена**

Андрющенко Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [i.betke@g.nsu.ru](mailto:i.betke@g.nsu.ru) стр. 247

Богомолова Александра Ильинична, магистрант 1 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Сенсорные свойства CVD-графена в различных атмосферах**

Смовж Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н.

e-mail: [a.bogomolova1@g.nsu.ru](mailto:a.bogomolova1@g.nsu.ru) стр. 248

Богословцева Алена Леонидовна, аспирант 2 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Влияние доли азота на получение пленок AlN методом импульсного магнетронного распыления**

Гейдт Павел Викторович, к.ф.-м.н.

e-mail: [a.bogoslovtseva@g.nsu.ru](mailto:a.bogoslovtseva@g.nsu.ru) стр. 249

Диденко Екатерина Алексеевна, 3 курс

Дубна, Государственный университет «Дубна», факультет естественных и инженерных наук

**Стохастические процессы электрических свойств в сложных многокомпонентных системах CIS**

Александр Сергеевич Дорошкевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [dea.@uni-dubna.ru](mailto:dea.@uni-dubna.ru) стр. 250

Донских Катерина Георгиевна, магистрант 1 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, факультет естественных наук

**Особенности РФЭС-исследования каталитических систем [Ir(COD)Cl]<sub>2</sub>-L-SiO<sub>2</sub>**

Нартова Анна Владимировна, к.х.н.

e-mail: [katerinoso@yandex.ru](mailto:katerinoso@yandex.ru) стр. 251

Дружинин Александр Владимирович, н.с.

Черноголовка, Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна РАН,

лаб. поверхностей раздела в металлах

**Кинетика диффузионного массопереноса серебра в многослойных структурах системы Ag/AlN**

e-mail: [druzhinin@issp.ac.ru](mailto:druzhinin@issp.ac.ru) стр. 252

Коваленко Дарья Артемьевна, м.н.с.

Екатеринбург, Институт Металлургии УрО РАН, отдел физической химии

**Кинетика кристаллизации высокоэнтропийного сплава GdHoScAlCo**

Куликова Татьяна Владимировна, к.х.н.

e-mail: [darya.k.2000@list.ru](mailto:darya.k.2000@list.ru) стр. 253

Кокотов Дмитрий Георгиевич, 3 курс

Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Инженерная школа новых производственных технологий

**Многослойная YSZ/YAG люминесцентная керамика, активированная ионами редкоземельных элементов**

Валиев Дамир Талгатович, к.ф.-м.н.

e-mail: [dgk12@tpu.ru](mailto:dgk12@tpu.ru) стр. 254

Комлина Софья Владиславовна, 2 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Исследование смачиваемости медь-графеновых поверхностей**  
Андрющенко Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [s.komlina@g.nsu.ru](mailto:s.komlina@g.nsu.ru) стр. 255

Малецкий Александр Витальевич, стажер-исследователь  
Дубна, Объединенный институт ядерных исследований, лаборатория нейтронной физики  
**Исследование процесса массопереноса на начальной стадии спекания и его влияние на структуру ZTA композитной керамики**  
Константинова Татьяна Евгеньевна, д.ф.-м.н.  
e-mail: [sashamalecki097@gmail.com](mailto:sashamalecki097@gmail.com) стр. 255

Марков Егор Игоревич, 3 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Термомиграция жидких включений в кристалле KDP**  
Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [emarkov@sfedu.ru](mailto:emarkov@sfedu.ru) стр. 257

Никифоров Ярослав Александрович, аспирант 1 года обучения  
Новосибирск, Институт химии твердого тела и механохимии  
**Связь непараболической кинетики твердофазных реакций с ростом зерен**  
Бакланова Наталья Ивановна, д.х.н.  
e-mail: [y.nikiforov@g.nsu.ru](mailto:y.nikiforov@g.nsu.ru) стр. 258

Нуриахметов Заур Наилевич, 6 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Исследование электродинамических свойств композитов на основе ОУНТ и графена в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц**  
Черноусов Юрий Дмитриевич, к.т.н.  
e-mail: [zaur.nuriakhmetov@gmail.com](mailto:zaur.nuriakhmetov@gmail.com) стр. 260

Рыгина Мария Евгеньевна, м.н.с.  
Томск, Институт сильноточной электроники СО РАН, лаб. плазменной эмиссионной электроники  
**Обработка заэвтектического силумина импульсным электронным пучком с последовательным снижением плотности энергии пучка электронов доклада**  
e-mail: [ryginame@opee.hcei.tsc.ru](mailto:ryginame@opee.hcei.tsc.ru) стр. 261

Свирков Александр Сергеевич, аспирант 1 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, ИШФВП  
**Исследование процесса спекания LiZn феррита, изготовленного методом 3D печати**  
Лысенко Елена Николаевна, д.т.н.  
e-mail: [svirkov@tpu.ru](mailto:svirkov@tpu.ru) стр. 262

Сорокин Дмитрий Владимирович, аспирант 1 года обучения  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, Институт теплофизики СО РАН, физический  
**Фотопроводимость графена с наночастицами титана**  
Смовж Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [sorokindima0507@gmail.com](mailto:sorokindima0507@gmail.com) стр. 263

Суворова Екатерина Витальевна, инженер-исследователь  
Екатеринбург, Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, отдел наноспинтроники  
**Структура и магнитные свойства наночастиц FeNi@C по данным ЯМР и мессбауэровской спектроскопии**  
Михалев Константин Николаевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [e.v.suvorkova@mail.ru](mailto:e.v.suvorkova@mail.ru) стр. 264

Царенко Андрей Васильевич, магистрант 1 года обучения  
Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники  
**Получение и исследование двумерных систем на основе наночастиц золота**  
Лукьяненко Анна Витальевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [tsarienko.2001@mail.ru](mailto:tsarienko.2001@mail.ru) стр. 265

## **Исследование влияния графенового покрытия на смачиваемость поверхностей методом молекулярной динамики**

**Артишевский Кирилл Витальевич**  
*Новосибирский государственный университет*  
Андрющенко Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.  
[k.artishevskii@g.nsu.ru](mailto:k.artishevskii@g.nsu.ru)

Смачиваемость [1-3] - это одно из важнейших свойств поверхностей. Зная механизмы формирования этого свойства, можно управлять смачиваемостью различных устройств [4]. На смачиваемость влияют геометрия, материал поверхности, а также наносимые на поверхность покрытия. Степень смачиваемости определяют при помощи измерения контактного угла. При изучении смачиваемости классическими способами возникают проблемы, связанные со сложностью создания однородной по всей площади поверхности и экспериментальным измерением контактного угла. В данной работе эти проблемы обходятся путем моделирования изучаемой системы методом молекулярной динамики.

Целью работы является исследование влияния текстуры, а также наличие графенового покрытия на смачиваемость различных поверхностей.

Для работы с методом молекулярной динамики был выбран пакет LAMMPS. Смачиваемость поверхности определялась путем наблюдения за растеканием капли воды на ее поверхности. Тип молекул воды, используемый в моделях – TIP4P. Рассматривались подложки из меди, графита или медь-графенового композита, с гладкой или текстурированной поверхностью (построенной по уравнению:  $z(x) = \alpha \cdot \sin(2\pi x/\beta)$ ). Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  принимали целочисленные значения 2, 4, 6 и 20, 40, 60 соответственно и задавали максимальную высоту и периодичность выступов.

В ходе работы были получены следующие результаты: на медной подложке контактный угол составлял  $\sim 10^\circ$ , на графите  $\sim 85^\circ$ . При нанесении на медную подложку графена, контактный угол увеличивался. При одном слое угол составлял  $\sim 30^\circ$ , при нанесении двух слоев  $\sim 60^\circ$ , при трех слоях значение контактного угла становилось равным значению угла на графите. При увеличении значений параметра  $\alpha$ , величина контактного угла увеличивалась. При увеличении параметра  $\beta$ , контактный угол как увеличивался, так и уменьшался. Также различалась динамика растекания капли на подложках из различных материалов. На подложке из графита капля перемещалась по всей поверхности. На медной подложке капля сохраняла горизонтальное положение центра масс и растекалась вдоль шероховатостей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00260).

Список публикаций:

- [1] Macko J., Podrojškova 'N., Orinakova R., Orinak A. *New insights into hydrophobicity at nanostructured surfaces: ~x-eriments and computational models* // *Nanomaterials Nanotechnol.* 2022. V. 12. 18479804211062316.
- [2] Chen L., Wang S. Y., Xiang X., Tao W. Q. *Mechanism of surface nanostructure changing wettability: A molecular dynamics simulation* // *Comput. Materials Sci.* 2020. V. 171. 109223.
- [3] Liao M. J., Duan L. Q. *Dependencies of surface condensation on the wettability and nanostructure size differences* // *Nano~aterials.* 2020. V. 10, N 9. 1831.
- [4] Shafiq M., Anjum S., Hano C., et al. *An overview of the applications of nanomaterials and nanodevices in the food industry* // *Foods.* 2020. V. 9, N 2. 148.

## **Влияние высыхающих капель на проводящие характеристики графена**

**Бетке Игорь Андреевич**  
*Новосибирский государственный университет*  
Андрющенко Владимир Андреевич  
[i.betke@g.nsu.ru](mailto:i.betke@g.nsu.ru)

Известно, что графен, гексагональная решётка  $sp^2$  гибридованных атомов углерода, изменяет свои проводящие свойства при погружении в водную среду [1]. На основе данного эффекта в настоящее время создаются манометры и датчики истечения, не изменяющие свойства исходных потоков. В данной работе исследуется наличие подобного эффекта в процессе высыхания водных капель на поверхностях, покрытых графеном.

Цель работы - провести серию экспериментов, измерить скорость изменения контактного угла, площади контакта высыхающей капли с поверхностью и сопротивление графенового чипа на непроводящей подложке, а также установить основные взаимосвязи между этими величинами.

В экспериментах используется графен, синтезированный на медной фольге методом CVD при атмосферном давлении и перенесенный на подложки SiO<sub>2</sub> через водную среду. Ранее было показано, что данный метод одновременно обладает высокой воспроизводимостью и хорошим качеством переносимого графена [2].

В работе рассматриваются подложки SiO<sub>2</sub> с разными значениями шероховатости, на которых выявлены различные характеры высыхания капель. На более шероховатых образцах капля постепенно увеличивает радиус кривизны при неизменной площади контакта, что объясняется сильным поверхностным взаимодействием. На гладких напротив, капля равномерно сжимается при неизменном контактном угле.

Установлено, что для режима высыхания на более гладкой поверхности, зависимость проводимости образца от площади капли с высокой точностью линейна. Данное обстоятельство будет полезно при развитии приборов, использующих сенсорные свойства графена. Эффект изменения сопротивления в среднем составляет 6-7% от общего сопротивления композита (подложки, покрытой графеном) для капли объемом 0.5 мкл и графенового чипа площадью 0.5 см<sup>2</sup>. Повышение сопротивления образца при высыхании капли можно объяснить легированием образца всевозможными органическими примесями.

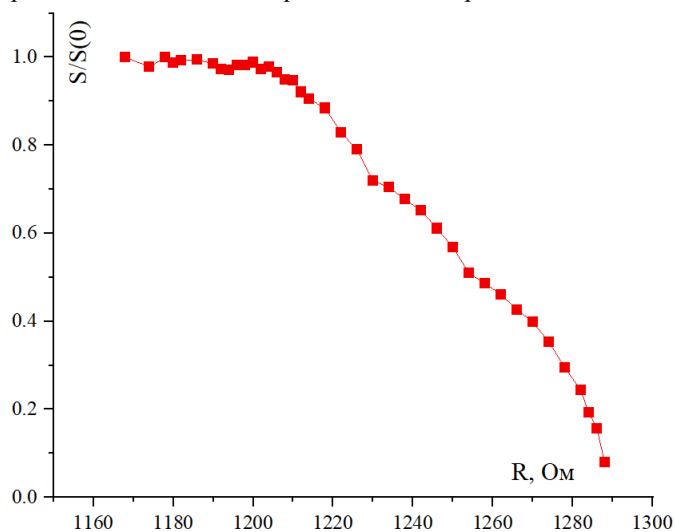


рис.1. Зависимость сопротивления шероховатого графенового чипа от площади контакта высыхающей капли

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00260).

Список публикаций:

- [1] Andryushchenko V.A. et al. Graphene-polymer composite conductivity in air and water // *Applied Surface Science*. 2021. V. 567. P. 150843.
- [2] Andryushchenko V.A., Sorokin D.V., Betke I.A., ... & Smovzh D.V. Control of graphene adhesion to substrate during transfer through liquid // *Journal of Molecular Liquids*. 2024. V. 395. P. 123827.

## Сенсорные свойства CVD-графена в различных атмосферах

*Богомолова Александра Ильинична*

*Новосибирский государственный университет*

*Смовж Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н.*

*[a.bogomolova1@gsu.ru](mailto:a.bogomolova1@gsu.ru)*

Графен - это двумерный материал, состоящий из моноатомного слоя углерода. Графен обладает уникальными свойствами, такими как высокая электропроводность, механическая прочность и удельная поверхность. Благодаря этим свойствам графен является превосходным материалом для создания чувствительных и высокоэффективных газовых датчиков. Графеновые газовые датчики обладают высокой чувствительностью, селективностью и быстрым временем реагирования на изменения концентрации газов в окружающей среде. Они находят применение в различных областях, включая медицину, промышленность, экологию и безопасность, для обнаружения токсичных и загрязняющих веществ. Благодаря своим уникальным электронным свойствам, графеновые газовые датчики также обладают потенциалом для создания портативных

и миниатюрных устройств, которые могут быть интегрированы в различные устройства микроэлектроники и электромеханические системы для мониторинга окружающей среды.

Целью настоящего исследования является изучение сенсорных свойств ХОГФ графена и их зависимости от структуры графенового покрытия. Синтез графена производился методом химического парового осаждения из метана на медной подложке. В качестве подложек, на которые осуществлялся перенос, были использованы пластины кремния. Газочувствительные свойства полученных датчиков исследовались на специализированной газовой установке. В состав установки входят газопроводы для анализируемых газов: диоксида азота и газа-носителя синтетического воздуха. Скорость потока газовой смеси, подаваемой в измерительную ячейку для контакта с газовыми датчиками, составляла 200 мл/мин. Поток газа-аналита меняли таким образом, чтобы полученная смесь имела определенную концентрацию газа (25–100 ppm). Измерения проводили по следующей методике: первым шагом было измерение базовой линии, при этом газ-носитель подавался в течение 50 минут со скоростью потока 200 мл/мин. Затем в ячейку в течение 10 мин подавался газ-аналит определенной концентрации, далее в течение 10 мин подавался чистый газ-носитель для продувки системы и восстановления сенсора. Сенсорные свойства газовых датчиков исследовались при комнатной температуре ( $25 \pm 3$  °C). Данные измерений были импортированы в Origin® 2018b (OriginLab Corporation) и обработаны далее для компенсации отклонения базовой линии.

Показано что максимальной чувствительностью графеновые чипы обладают к содержанию в атмосфере диоксида азота, при этом отклик  $R/R_0$  составляет 4,5% при концентрации газа-аналита 25 ppm. Таким образом, предложенный в работе способ позволяет создавать графеновые сенсоры, для повышения чувствительности и селективности которых можно использовать функционализацию наночастицами металлов.

## **Влияние доли азота на получение пленок AlN методом импульсного магнетронного распыления**

*Богословцева Алена Леонидовна*

*Новосибирский государственный университет*

*Гейдт Павел Викторович, к.ф.-м.н.*

*[a.bogoslvtseva@ngsu.ru](mailto:a.bogoslvtseva@ngsu.ru)*

AlN активно применяется в микроэлектронике благодаря пьезоактивности, высокой скорости звука в нем (~ 11 км/с), большой ширины запрещенной зоны (6,2 эВ) и совместимости с комплементарными структурами металл-оксид-полупроводник (КМОП). Для того, чтобы обладать пьезоактивностью AlN должен иметь гексагональную структуру в направлении оси *c*, которую можно получить методом магнетронного распыления. Однако подбор параметров, позволяющих получать пленки нитрида алюминия с высокой скоростью осаждения и гексагональной структурой, по-прежнему остается нетривиальной задачей. В представленной работе изучается влияние доли азота на скорость роста и структуру пленок AlN. Эксперименты по получению пленок AlN проводились на установке магнетронного распыления с применением ассиметричного биполярного источника постоянного тока, работающего в импульсном режиме постоянного тока с частотой 100 кГц и длительностью положительного импульса 3 мкс. Поверхность подложки располагается параллельно поверхности мишени на расстоянии 80 мм от нее. Монокристаллический кремний (Si) p-типа, легированный бором (B) с кристаллографической ориентацией (111), применялся в качестве подложки во всех экспериментах. Во время осаждения пленок AlN варьировались значения суммарного потока аргона (Ar) и азота (N) и доля азота в газовой смеси. Значения суммарного потока принимали значения в 60, 80 и 100 мл/мин, а доля азота – 20, 30 и 40 %. Остальные параметры осаждения оставались постоянными. Мощность магнетрона составляла 150 Вт, температура подложки составляла 200 °C. Полученные пленки изучались с применением рентгенофазового анализа (РФА), эллипсомерии, растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). При фазовом анализе с помощью РФА было установлено, что все пленки являются однофазными, поскольку на дифрактограммах наблюдаются только рефлексы (002) и (004), что является характерной картиной для поликристаллического AlN, ориентированного строго перпендикулярно подложке в направлении оси *c*. При анализе морфологии было выявлено, что вне зависимости от потока газа на поверхности пленки не возникает значительных особенностей. При анализе элементного состава было установлено, что он не зависит от суммарного потока и доли азота. Содержание азота составляет от 51 до 53 ат. %, алюминия от 45 до 47 ат. %, кислорода и углерода меняется в пределах от 0 до 2 ат.%. Таким образом изменение состава от образца к образцу не превышает погрешности метода. Толщина пленок и показатель преломления определялась с использованием эллипсометрии. Показатели преломления определялись в приближении модели однослойной пленки. Значения находятся в интервале 1,9-2,1 без каких-либо явных корреляций с параметрами процесса осаждения пленок. Данные значения характерны для ориентированных в направлении оси *c*, хорошо текстурированных пленок AlN. При анализе скорости роста

пленки (Рисунок 1) было определено, что с увеличением как суммарного потока, так и доли азота в газовой смеси происходит падение скорости роста. Скорость роста считалась линейной и определялась как величина прямо обратная толщине пленки и обратно пропорциональная времени осаждения. При увеличении суммарного потока газовой смеси скорость роста пленок падает, поскольку увеличивается давление в области магнетронного разряда. Рост давления приводит к снижению длины свободного пробега распыляемых частиц, которые рассеиваются на атомах и молекулах газовой смеси и теряют кинетическую энергию. За счет этого меньшее число распыляемых частиц достигает подложки, и скорость роста пленок падает. Увеличение доли азота ведет к увеличению в смеси газов более легких ионов азота, которые обладают более низкой эффективностью распыления и скоростью осаждения.

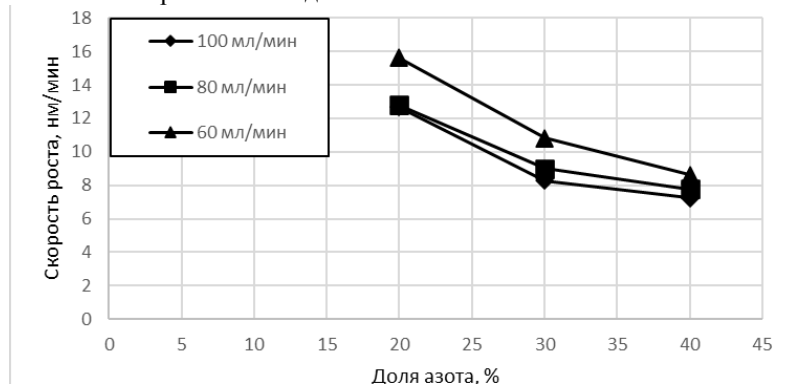


рис.1. Зависимость скорости роста пленки от доли азота в газовой смеси

Работа выполнена на базе приборного парка ЦКП «ВТАН» НГУ и финансово поддержана проектом ГосЗадания МНВО РФ № FSUS-2024-0020.

Список публикаций:

[1] Shayapov, V. R., Bogoslovtseva, A. L., Chepkasov, S. Y., Asanov, I. P., Maksimovskiy, E. A., Kapishnikov, A. V., Mironova, M. I., Lapega, A. V., Geydt, P. V. // *Coatings*. 2023. V. 13. №. 7. P. 1281.

## Стохастические процессы электрических свойств в сложных многокомпонентных системах CIS

*Диденко Екатерина Алексеевна*

*Дорошкевич Александр Сергеевич, Самедова Улькар Фаррух кызы, Оксенгендлер Борис Леонидович*

*Государственный университет «Дубна»*

*Дорошкевич Александр Сергеевич, к.ф.-м.н.*

*[dea.21@uni-dubna.ru](mailto:dea.21@uni-dubna.ru)*

Проблема возобновляемых источников энергии актуальна в настоящий момент и в аспекте возобновляемой энергетики актуальна разработка устройств, функционирующих на основе новых физических принципов, в частности, активно разрабатываются новые материалы для адсорбционной электроэнергетики. Разработке и использованию приборов преобразования химической энергии адсорбции воды и света в электрический вид посвящено множество работ из передовых научных центров во всем мире. Одним из таких конвертеров является тройное соединение состава  $\text{CuInSe}_2$  (CIS), которое характеризуется высокой эффективностью фотоэлектрической конверсии и является перспективным материалом для использования в фотовольтаике [1].

Материалы на основе  $\text{CuInSe}_2$  являются наиболее перспективными среди полупроводников 21-века, так как могут быть использованы в солнечных элементах [2]. Полупроводниковые соединения на основе селенидов редкоземельных (In, Ga) и переходных металлов (Cu) наиболее предпочтительные как тонкопленочные солнечные элементы, обладающие низкой стоимостью и многообещающей тенденцией в повышении эффективности [3]. Они способны совместить в себе свойства как преобразователей адсорбции молекул воды, так и фотоконвертеров. Варьирование структуры и химического состава  $\text{CuInSe}_2$  путем изменения условий синтеза и добавления легирующих элементов позволяет изготавливать материалы с широким спектром различных физических характеристик.

Таким образом, изучение электрических свойств и структурных особенностей кристаллов на основе  $\text{CuInSe}_2$  с добавлением разных концентраций легирующих добавок было целью данной работы.

В качестве исследуемых объектов использовались соединения состава  $x\text{mol.}\% \text{MeSe}-(100-x)\text{mol.}\% \text{CuInSe}_2$ , где  $\text{Me} = \text{Mn/Fe}$ ,  $x = 5, 3, 7, 10$ .

Исследование фазового состава кристаллов осуществляли на дифрактометре ДРОН-3М, в отфильтрованном медном излучении с получением результатов в оцифрованном виде (рис. 1). Исследование структуры поверхности проводилось с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-200A (фирмы JEOL). Вольт-амперные характеристики были получены в режиме линейной развертки на устройстве P-20X ("Elinns"). В качестве осветителя использовалась галогеновая лампа мощностью 50Вт.

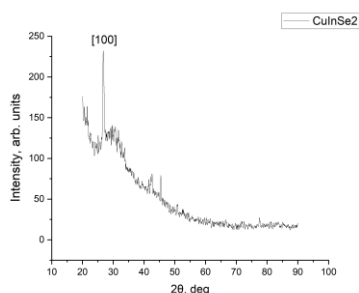


рис. 1. Дифрактограмма кристалла состава  $\text{CuInSe}_2$ .

В ходе работы установлена зависимость вольт-амперных характеристик исследуемых систем от воздействия фотонов и степени гидратированности атмосферы. Электрические параметры материалов имеют накопительный характер: наблюдается циклический процесс возрастания и уменьшения проводимости образцов, среднее время всех полученных циклов составило 60 мин. Отмечено, что время воздействия внешних факторов не влияет на вид кривой. Ранее для поликристаллических систем наблюдались немонотонности в виде неравномерных скачков тока в темновом режиме при высокой степени гидратированности атмосферы ( $\eta > 75\%$ ), такие скачки сохраняются при длительном воздействии влажности и также они подавляются при переходе на световой режим.

Благодарность. Исследование было выполнено в рамках проектов сотрудничества Сербии и ОИЯИ № 373 2023, пункты 4 и 5, проектов сотрудничества Сербии и ОИЯИ № 178, пункты 7 и 8, проектов сотрудничества Беларуси и ОИЯИ № 308, пункты 21 и 22.

Список публикаций:

[1] Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов // АЭЭ. 2009. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/solnechnye-elementy-na-osnove-poluprovodnikovyh-materialov>.

[2] Sh. M. Gasanlyya, A. A. Abdurragimovb, and U. F. Samedovaa The Electric and Thermoelectric Properties of  $\text{CuInSe}_2$ -based Chalcopyrite // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2012, Vol. 48, No. 5, pp. 439–443, 1068–3755, DOI 10.3103/S106837551205004.

[3] Гременок В., Тиванов М. Современные тонкопленочные фотоэлектронпреобразователи на основе халькогенидных материалов // Наука и инновации. – 2023. – №. 11. – С. 57-62.

## Особенности РФЭС-исследования каталитических систем $[\text{Ir}(\text{COD})\text{Cl}]_2\text{-L-SiO}_2$

Донских Катерина Георгиевна

Квон Рэн Ил, Ковтунова Лариса Михайловна, Нартова Анна Владимировна

Новосибирский государственный университет

Нартова Анна Владимировна

[katerinoso@yandex.ru](mailto:katerinoso@yandex.ru)

Одноцентровые закрепленные катализаторы являются одной из передовых областей современного гетерогенного катализа [1]. Активными центрами в них выступают атомы переходного металла, входящие в состав комплексов, закрепленных через линкеры – органические цепочки разного состава – на оксидных носителях.

Комплекс  $[\text{Ir}(\text{COD})\text{Cl}]_2$  (COD – 1,5 – циклооктадиен) используется в качестве активного компонента одноцентровых нанесенных катализаторов гидрирования алкенов с активным центром  $\text{Ir}^{1+}$ . Данный комплекс закрепляется на носителе  $\text{SiO}_2$  с помощью линкеров методом пропитки [1]. В работе использовались линкеры состава:  $\text{C}_6\text{H}_{16}\text{N}_3$  (а),  $\text{C}_7\text{H}_9\text{N}$  (б),  $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{N}$  (с). Варьируя состав линкера можно влиять на характеристики катализатора, в частности, количество закрепленного комплекса и его стабильность.

Так как система  $[\text{Ir}(\text{COD})\text{Cl}]_2\text{-L-SiO}_2$  субмонослойная, наиболее информативным методом её изучения является РФЭС (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия). В ранних исследованиях экспериментально



показано, что комплекс деградирует под воздействием рентгеновских лучей [2]. Следовательно, необходимо разработать особые подходы к процедурам записи РФЭС-спектров изучаемых систем. С целью минимизировать влияние рентгеновского излучения на образцы были отработаны методики быстрой записи РФЭС-спектров. В ходе экспериментов показано, что количественный анализ РФЭС-данных целесообразно проводить в течение первых 5 минут экспозиции рентгеновского излучения, закладывая на хлор 2 скана по 0.5 секунд в точке. При данных параметрах падение концентрации хлора незначительно. Запись аналогичного спектра спустя 30 минут после включения пушки показывает потерю хлора в среднем 10%. Данная методика позволяет использовать отношение Ir/Cl в качестве критерия целостности закрепления комплекса.

Отдельно был оценен вклад поверхностных атомов кремния в РФЭС-спектр линию Si2p, который составил 12% для всех вышеперечисленных систем. Это позволило уточнить атомные отношения N/Si для носителей L-SiO<sub>2</sub>: 0.87 (а), 0.30 (б), 0.55 (с) и для носителей с закрепленным комплексом: 0.90 (а), 0.29 (б), 0.57 (с). Данные значения показывают, что количество линкера на поверхность оксидного носителя не меняется при введении комплекса, следовательно, все использованные линкеры стабильны в условиях нанесения активного компонента. При этом, в случае линкера C<sub>6</sub>H<sub>16</sub>N<sub>3</sub> достигается максимальная степень покрытия SiO<sub>2</sub> линкером, что коррелирует с максимальной загрузкой активного компонента. Также были посчитаны отношения Ir/Si: 1.07 (а), 0.39 (б), 0.52 (с) и отношения Ir/N: 1.18 (а), 1.34 (б), 0.90 (с). Тот факт, что отношение Ir/N > 1, говорит о том, что комплекс может связываться с линкером с сохранением димера, координируясь к линкеру через один Ir. Анализ экспериментальных спектров Ir4f указывает на разницу в форме РФЭС-линий в зависимости от линкера. При этом согласно атомным отношениям Ir/Cl во всех случаях предполагается сохранение целостности закрепления комплекса [Ir(COD)Cl]. Апроксимация пиков Ir4f и Si2p функциями Гаусса-Лоренца позволила выявить уширение спектров в случаях с ликером (б) и (с). Причиной уширения может служить как дифференциальная подзарядка, так и наличие дополнительного химического состояния иридия. Анализ полученных данных указывает на то, что во всех случаях иридий находится в состоянии Ir<sup>1+</sup>, а изменение формы линии определяется особенностями образцов, связанными с закреплением линкера на оксидном носителе.

Таким образом, в данной работе продемонстрированы возможности метода РФЭС как инструмента, позволяющего установить влияние природы линкера на активный компонент закрепленного одноцентрового катализатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0032), а также при поддержке Программы Приоритет-2030.

Список публикаций:

[1] Nartova A.V., Kvon R.I., Kovtunova L.M., Skovpin I.V., Koptuyug I.V. and Bukhtiyarov V.I. // XPS and HR TEM elucidation of the diversity of titania-supported single-site Ir catalysts performance in spin-selective propene hydrogenation // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023, 24.

[2] Fernando N. K., Cairns A. B., Murray C. A., Thompson A. L., Dickerson J. L., Garman E. F., Ahmed N., Ratcliff L.E., Regoutz A. Structural and Electronic Effects of X-ray Irradiation on Prototypical [M(COD)Cl]<sub>2</sub> Catalysts. *J. Phys. Chem. A* 2021, 125, 34, 7473–7488

## Кинетика диффузионного массопереноса серебра в многослойных структурах системы Ag/AlN

Дружинин Александр Владимирович<sup>1</sup>  
Claudia Cancellieri<sup>2</sup>, Jolanta Janczak-Rusch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук

<sup>2</sup>Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology

[druzhinin@issp.ac.ru](mailto:druzhinin@issp.ac.ru)

Исследование эволюции микроструктуры многослойных структур (МС), вызванной тепловым воздействием, имеет принципиальное значение для расширения области промышленного применения таких материалов. Одним из отличительных механизмов термической деградации МС является отток одного из компонентов на поверхность структуры [1]. Этот процесс происходит при температурах существенно более низких, чем температура плавления компонента, что предоставляет новые возможности для создания твердофазных припоев на их основе.

В данной работе представлен экспериментально-модельный подход для количественного исследования кинетики диффузионного массопереноса серебра из объема многослойной структуры системы Ag/AlN на ее поверхность. МС системы Ag/AlN были получены методом магнетронного распыления мишени. Толщина

каждого слоя 10 нм, число повторений каждого слоя в структуре 20 (т.е. количество бислоев Ag+AlN). Экспериментальный анализ основан на *in situ* анализе эволюции интенсивности сигнала рентгеновской дифракции, полученной от фазы серебра на поверхности МС, в геометрии скользящего пучка при одновременном отжиге при температурах 230, 330, 425°C в потоке азота. Для анализа экспериментальных данных была разработана диффузионная модель, где в качестве основной движущей силы диффузии серебра рассматривается стремление системы уменьшить (сжимающие) остаточные механические напряжения в слоях серебра, которые появляются в процессе напыления последних. На начальной стадии отжига в объеме МС системы Ag/AlN появляются каналы диаметром порядка 20 нм, формирование которых связано с термическим травлением границ зерен серебра [2,3]. В процессе отжига атомы серебра диффундируют на поверхность МС по стенкам каналов. При выбранных температурах отжига кинетика массопереноса серебра на поверхность МС определяется преимущественно диффузией серебра вдоль межфазных границ раздела Ag/AlN (объемная самодиффузия серебра пренебрежительно мала): кинетика массопереноса лимитируется кинетикой диффузии серебра в объеме слоя, т.к. диффузия по стенке канала (механизм поверхностной диффузии) является наиболее быстрой. Исходя из полученной модели, были определены коэффициенты диффузии ( $1.98 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$  при 230°C,  $3.04 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$  при 330°C,  $1.28 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$  при 425°C) и энергия активации диффузии ( $0.57 \pm 0.01 \text{ эВ}$ ) серебра вдоль межфазных границ раздела Ag/AlN. Полученная температурная зависимость коэффициента диффузии имеет следующий вид:  $D = (4.40 \pm 0.48) \times 10^{-9} \exp\left(-\frac{(0.57 \pm 0.01) \text{ эВ}}{kT}\right) \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00006 (<https://rscf.ru/project/22-72-00006/>) «Термическая стабильность многослойных структур системы Ag/AlN».

Список публикаций:

- [1] A.V. Druzhinin, D. Ariosa, S. Siol, N. Ott, B.B. Straumal, J. Janczak-Rusch, L.P.H. Jeurgens, Cancellieri // *Materialia*. 2019. T. 7. C. 100400.  
 [2] W.W. Mullins // *Journal of Applied Physics*. 1957. T. 28. C. 333–339.  
 [3] A.V. Druzhinin, C. Cancellieri, E.A. Klyatskina, A.A. Mazilkin, N.N. Khrapova, B.B. Straumal, J. Janczak-Rusch // *Surf. Coatings Technol.* 2023. T. 471. C. 129880.

## Кинетика кристаллизации высокоэнтропийного сплава GdHoScAlCo

**Коваленко Дарья Артемьевна**

**Быков Виктор Анатольевич, Куликова Татьяна Владимировна**

**Институт Металлургии УрО РАН**

Куликова Татьяна Владимировна

[darya.k.2000@list.ru](mailto:darya.k.2000@list.ru)

Высокоэнтропийные сплавы являются относительно новыми материалами, для которых механизмы кристаллизации, термические и кинетические характеристики до сих пор остаются малоизученными. В качестве объекта исследования был выбран состав GdHoScAlCo, так как аморфные сплавы на основе Sc-Al-Co обладают уникальными прочностными и коррозионными характеристиками [1]. Кроме того, добавки редкоземельных элементов (Gd, Ho) заметно влияют на стеклообразующую способность этих сплавов и их механические свойства [1]. Поэтому с целью получения материалов с заданными свойствами было проведено комплексное исследование кинетики кристаллизации сплава GdHoScAlCo в неизотермических и изотермических условиях.

Дифференциальная сканирующая калориметрия в неизотермических условиях обнаруживает сложную четырехступенчатую кристаллизацию аморфного сплава при различных скоростях нагрева. Согласно построенной нелинейной кинетической модели, процесс кристаллизации протекает как комбинированная реакция автокатализа в виде двух параллельных реакционных путей в соответствии с гетерогенной реакцией n-го порядка с автокатализом по уравнению Камала-Сорора.

Исследование в изотермических условиях показало, что время инкубации и кристаллизации сокращается с увеличением температуры отжига. Рассчитанный локальный индекс Аврами  $n$  находился в пределах  $1,5 < n < 2,5$ , что говорит о преобладании в процессе кристаллизации диффузионно-контролируемого трехмерного роста с уменьшающейся скоростью зародышеобразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-23-00100).

Список публикаций:

- [1] K. Gao, X.G. Zhu, L. Chen, W.H. Li, X. Xu, B.T. Pan, W.R. Li, W.H. Zhou, L. Li, W. Huang, Y. Li. // *Recent development in the application of bulk metallic glasses // Journal of Materials Science & Technology*. 2022. 131. 115–121.

# Многослойная YSZ/YAG люминесцентная керамика, активированная ионами редкоземельных элементов

Кокотов Дмитрий Георгиевич

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Валиев Дамир Талгатович, к.ф.-м.н.

[dgk12@tpu.ru](mailto:dgk12@tpu.ru)

Многослойная люминесцентная керамика представляет собой тип керамического материала, для которого характерно скачкообразное пространственное изменение физико-механических свойств, в связи со слоистой структурой, состоящей из различных керамических материалов [1]. Интерес в исследовании таких материалов заключается в возможности направленной коррекции, или активации центров свечения, с целью изменения оптико-люминесцентных свойств и в последующем использовании в качестве преобразователя излучения. В настоящее время наиболее перспективными являются наноструктурированные керамики на основе иттрий-алюминиевого граната ( $Y_3Al_5O_{12}$ , YAG) и кубического диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ). Выбор прозрачных керамик на основе YAG и YSZ в качестве компонентов функционально-градиентных керамик (ФГК), обусловлен комплексом их высоких физико-механических и оптико-люминесцентных свойств. Целью данной работы является исследование структурных и люминесцентных свойств многослойной керамики состава YSZ/YAG, активированной ионами редкоземельных элементов.

Объектом исследования является многослойная люминесцентная керамика состава YSZ/YAG, активированная ионами церия, полученная методом электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС), технологический процесс получения подробно описан в [2] и схематично представлен на рисунке 1а. В результате спекания были получены слоистые образцы ФГК цилиндрической формы, толщиной ~2 мм, диаметром ~14 мм. Для проведения исследований из центральной части образцов вырезали пластинки шириной 13 мм, толщиной 1 мм. Консолидированная методом электро-импульсного спекания многослойная керамика и микрофотография структуры представлены на рисунке 1б. Исследование катодо- и фотолюминесцентных свойств образцов ФГК проводилось при использовании интегрирующей сферы и калиброванного спектрофотометра AvaSpec-ULS3648 с временем интегрирования 1 с., в качестве источника возбуждения фотолюминесценции использовался лазерный диод с длиной волны 445 нм, катодолуминесценция возбуждалась потоком ускоренных электронов ( $E_{cp}=250$  кэВ,  $t_{1/2}=15$  нс).

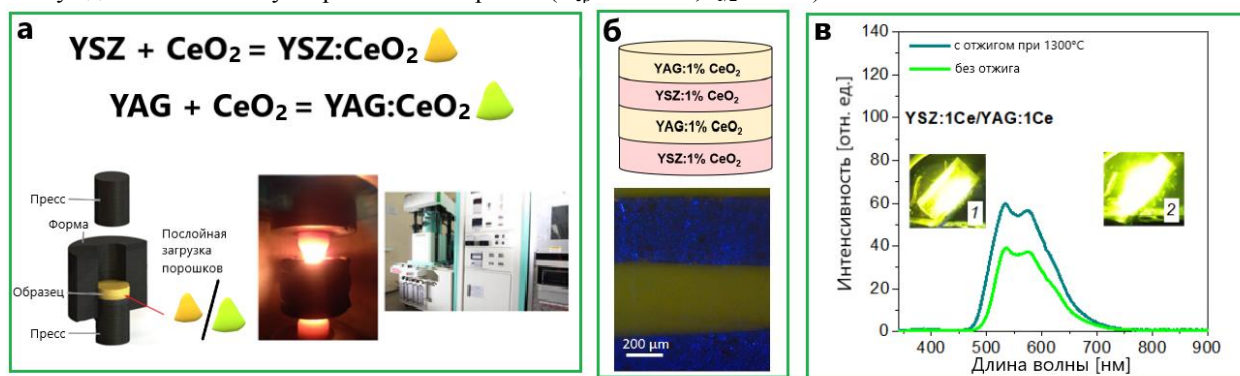


рис. 1 Схема эксперимента (а); модель размещения слоев и микрофотография среза YAG/YSZ керамики (б); спектры катодолуминесценции (в)

В спектрах катодолуминесценции (рис.1в) при возбуждении потоком ускоренных электронов регистрируется широкая полоса свечения в диапазоне 480-750 нм. Данная полоса люминесценции может быть разложена на две полосы гауссовой формы с максимумами при 530 и 560 нм и связана с  $5d_1-4f_1$  ( $^2F_{5/2}$ ) и  $5d_1-4f_1$  ( $^2F_{7/2}$ ) переходами ионов  $Ce^{3+}$ .

В результате проведенных исследований была изготовлена люминесцентная многослойная керамика состава YSZ:CeO<sub>2</sub>/YAG:CeO<sub>2</sub> методом ЭИПС. Исследованы микроструктура и оптико-люминесцентные характеристики полученных образцов люминесцентной многослойной керамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№. 21-73-10100). В работе применялось оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Список публикаций:

- [1] Dongjiang Wu, Jing Shi, Fangyong Niu, et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. 2022 – Vol. 42., Is. 6. P. 2957-2973
- [2] D. Valiev, S. Stepanov, V. Paygin, et al. // *Ceramics International*. 2023. – Vol. 49., Is. 21. P. 33557-33565

## Исследование смачиваемости медь-графеновых поверхностей

*Комлина Софья Владиславовна*

*Новосибирский государственный университет*

*Андрющенко Владимир Андреевич, к.ф.-м.н.*

*[s.komlina@g.nsu.ru](mailto:s.komlina@g.nsu.ru)*

Графен – это моноатомный слой  $sp^2$ -гибридизованных атомов углерода. Обладая рекордно высокими характеристиками теплопроводности, переноса зарядов, механической прочности и химической стабильности, он нашёл широкое применение во множестве сфер – от биоинженерии до микроэлектроники [1]. Одной из актуальных задач современной науки является создание поверхностей с заданными свойствами. Такие поверхности могут быть «настроены» под конкретные задачи, обеспечивая оптимальные условия для различных процессов. Графен, благодаря своей уникальной структуре и свойствам [2], представляет собой идеальный материал для создания подобных поверхностей. Исследование бифильных покрытий на основе графена может привести к разработке новых материалов с широким спектром применения и улучшенными характеристиками.

Цель работы – отработать методику синтеза бифильных поверхностей и исследовать характер изменения контактного угла в зависимости от процента покрытия образца графеном.

Для создания образцов применялся метод парофазного осаждения на медную фольгу при атмосферном давлении с использованием метана в качестве углеводорода. Время стандартного синтеза однослойного графена составляет 10 минут [3]. В данной работе этот параметр варьировался от 1 до 30-ти минут, изменяя в диапазоне от 1 до 10 минут процент покрытия образца графеном, а после – число графеновых слоёв. Синтезировано несколько образцов, на каждом из которых измерялся контактный угол после вынесения в атмосферу и до момента стабилизации (в среднем не менее двух часов).

Показано, что начальный контактный угол линейно возрастает с увеличением времени синтеза от  $\sim 13^\circ$  для 1.5 мин до  $\sim 87^\circ$  для 30 минут. Также установлено, что контактный угол увеличивается со временем и после первого часа измерений практически стабилизируется, выходя на нейтральные значения, близкие к собственному контактному углу графита. По изображениям поверхности образцов, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, оценены скорость роста графена и доля покрытия образца графеновой плёнкой. Наблюдаемый характер изменения контактного угла может быть связан со степенью покрытия образца графеном – чем выше доля графена на поверхности, тем больше контактный угол – и его структурой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00260).

Список публикаций:

[1] Dias da Silva, A., Paschoalino, W. J., Damasceno, J. P. V., & Kubota, L. T. *Structure, properties, and electrochemical sensing applications of graphene-based materials // ChemElectroChem*. 2020. V. 7(22). 202001168

[2] Saqib Shams S., Zhang R., Zhu J. *Graphene synthesis: a Review // Materials Science-Poland*. 2015. V. 33. P. 566-578.

[3] Kondrashov, I., Komlenok, M., Pivovarov, P., Savin, S., Obratsova, E., & Rybin, M. *Preparation of copper surface for the synthesis of single-layer graphene // Nanomaterials*. 2021. V. 11(5). 1071.

## Исследование процесса массопереноса на начальной стадии спекания и его влияние на структуру ZTA композитной керамики

*Малецкий Александр Витальевич<sup>1,2</sup>*

*Дорошкевич Александр Сергеевич<sup>2</sup>, Константинова Татьяна Евгеньевна<sup>1</sup>,*

*Беличко Данил Романович<sup>1</sup>, Волкова Галина Кузьминична<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.А. Галкина*

<sup>2</sup>*Объединенный институт ядерных исследований*

*Константинова Татьяна Евгеньевна, д.ф.-м.н.*

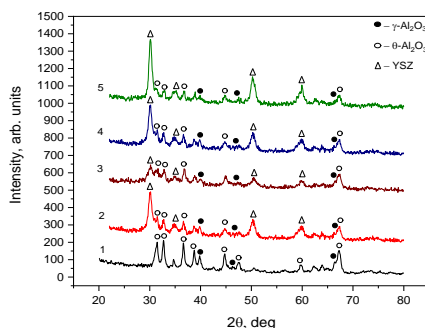
*[Sashamalecki097@gmail.com](mailto:Sashamalecki097@gmail.com)*

В настоящее время существует ряд методов, и активно разрабатываются новые подходы, направленные на оптимизацию технологии получения керамики  $Al_2O_3$ , а также направленные на модернизацию структуры и физико-механических свойств корундовой керамики [1-3]. Одним из способов улучшения свойств  $Al_2O_3$  является создание на ее основе композитной керамики, в частности, широкое применение нашла ZTA керамика [4]. Матрицей ZTA керамического композита служит  $\alpha-Al_2O_3$ , а наполнителем является стабилизированный тремя молярными процентами иттрия диоксид циркония ( $ZrO_2 + 3 \text{ мол.}\% Y_2O_3$  (YSZ)). Добавка YSZ в матрицу  $\alpha-Al_2O_3$  способствует повышению прочности и плотности композитной керамики, однако, при концентрации

YSZ  $\geq 10$  вес.% происходит агломерация зерен  $ZrO_2$  в матрице  $\alpha-Al_2O_3$ , что приводит к разупрочнению керамического композита и ухудшению его физико-механических свойств [5]. Недавние исследования показали, что перспективным методом получения керамики системы ZTA является использование метастабильных фаз оксида алюминия в качестве основы для получения композитной керамики. Такой подход позволяет получать керамические композиты системы  $Al_2O_3 + n\%$  YSZ с высокими физико-механическими свойствами при значительно меньших температурах спекания в сравнении с системой на основе стабильного  $\alpha-Al_2O_3$ . Также, использование полиморфных фаз оксида алюминия в связке с обработкой компактов высоким гидростатическим давлением препятствует процессу образования агломератов зерен диоксида циркония в матрице оксида алюминия [1].

В данной работе приведены результаты исследования влияния механизма массопереноса на начальной стадии спекания смеси метастабильных нанопорошков состава  $\gamma+\theta-Al_2O_3 + n\%$  YSZ ( $n = 0, 1, 5, 10, 15$  вес.%) на структуру керамического композита  $\alpha-Al_2O_3 + n\%$  YSZ ( $n = 0, 1, 5, 10, 15$  вес.%), в зависимости от концентрации легирующей примеси YSZ и обработки порошков высоким гидростатическим давлением (ВГД) (300 и 700 МПа).

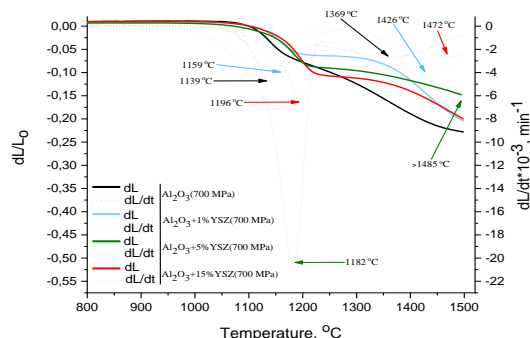
Методом РСА в указанных системах установлен “эффект взаимной защиты от кристаллизации” порошковых смесей, который наиболее полно проявляется в системе  $\gamma+\theta-Al_2O_3 + 5$  вес.% YSZ. Дифрактограммы указанных порошковых смесей приведены на *рис. 1*.



*рис. 1. Дифрактограммы порошковых смесей, отожженных при 1000 °С:*

1 -  $Al_2O_3 + 0\%$ YSZ, 2 -  $Al_2O_3 + 1\%$ YSZ, 3 -  $Al_2O_3 + 5\%$ YSZ, 4 -  $Al_2O_3 + 10\%$ YSZ и 5 -  $Al_2O_3 + 15\%$ YSZ

Поведение нанопорошков на начальной стадии спекания исследовали методом дилатометрии при постоянной скорости нагрева 5 °С/мин, в диапазоне температур от 20 °С до 1500 °С. Установлено, что спекание композитной системы  $\gamma+\theta-Al_2O_3 + n\%$  YSZ ( $n = 0, 1, 5, 10, 15$  вес.%) происходит в две стадии с торможением процесса усадки между стадиями. На первой стадии происходит уплотнение метастабильных фаз оксида алюминия, после чего начинается фазовый переход метастабильного оксида алюминия в стабильную форму  $\alpha-Al_2O_3$  с торможением процесса усадки, затем следует вторая стадия уплотнения  $\alpha-Al_2O_3$ . Полученные дилатометрические данные свидетельствуют, что ключевую роль в получении плотной композитной керамики играет вторая стадия спекания, которая соответствует уплотнению  $\alpha-Al_2O_3$  (*рис. 2*).



*рис. 2. Температурные зависимости изменения линейных размеров и скорости изменения линейных размеров в системах  $\gamma+\theta-Al_2O_3 + n\%$  YSZ ( $n = 0, 1, 5, 15$  вес.%) скомпактированных при ВГД 700 МПа*

Исследование структуры композитной керамики состава  $\alpha-Al_2O_3 + n\%$  YSZ ( $n = 0, 1, 5, 10, 15$  вес.%) показало, что в зависимости от величины механической обработки и концентрации легирующей примеси реализуется два типа структуры: агрегатно- и дисперсно-упрочненная структура. Для ННП < 500 МПа и YSZ  $\geq 5$  вес.% характерна агрегатно-упрочненная структура с малым распределением зерен  $Al_2O_3$  по размерам,

которая реализуется по зернограничному механизму спекания с параметром  $n = 1/3$ . Для  $\text{HHP} \geq 500$  МПа и  $\text{YSZ} \geq 5$  вес.% реализуется дисперсно-упрочненная структура, которой характерно бимодальное распределение зерен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  по размерам и переход от зернограничной диффузии зерен к объемной диффузии с  $n = 1/2$ . Установлено, что системы с  $\text{YSZ} < 5$  вес.% имеют агрегатно-упрочненную структуру и спекаются по механизму объемной диффузии с  $n = 1/2$  независимо от величины ВГД.

Список публикаций:

[1] Maletskyi A.V. et al. // *Ceramics International*, 49, 10, 2023, 16044-16052

[2] Drevet R. et al. // *Vacuum*, 221, 2024, 112881

[3] Dmitriev K. I. et al. // *Microporous and Mesoporous Materials*, 369, 2024, 113025

[4] Moraes M. et al. // *Materials Research-iberro-american Journal of Materials - MATER RES-IBERO-AM J MATER.* 7.

[5] Maletsky A.V. et al. // *Ceramics International*, 47, 14, 2021, 19489-19495,.

## Термомиграция жидких включений в кристалле KDP

*Марков Егор Игоревич*

*Южный федеральный университет*

*Гармашов Сергей Иванович, к.ф.-м.н.*

*[emarkov@sfedu.ru](mailto:emarkov@sfedu.ru)*

В настоящее время кристаллы группы дигидрофосфата калия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , сокращенное название – KDP) привлекают большое внимание в силу своих оптических свойств, таких как нелинейность и высокое двулучепреломление. Возникновение метода скоростного роста кристаллов KDP [1] открыло новые перспективы для возможности модификации кристаллов введением примесей различной природы и исследования влияния этих примесей на свойства кристалла [1, 2]. Но использование данного способа роста может приводить к формированию нежелательных включений [3].

Известно, что включениями в кристаллах можно управлять и, в частности, заставить их перемещаться в кристалле под действием градиента температуры в результате так называемого явления термомиграции включений [4, 5].

Поэтому целью данной работы являлось выяснение возможности реализации процесса термомиграции включений в кристалле KDP как способа удаления нежелательных включений из кристалла, возникших во время его роста, а также способа локального введения примесей с помощью движущихся включений.

Для этого, прежде всего, была поставлена серия экспериментов по искусственному созданию свободных жидких включений в кристалле KDP. Было рассмотрено несколько вариантов формирования и герметизации полости в кристалле для последующего образования из неё системы микровключений под действием градиента температуры : через трещины в кристалле, через глухие/сквозные отверстия с последующей их герметизацией, через заполнение раствором KDP свежего скола и дальнейшего его срачивания. Оптимальным способом было выбрано формирование глухих отверстий с последующим заполнением их насыщенным раствором кристалла KDP и герметизацией эпоксидной смолой.

Для проведения экспериментов по термомиграции использовалась ранее изготовленная установка, включающая цифровой микроскоп, хромель-алюмелевые термопары для измерения температуры и определения ее градиента и мощный резистор в качестве нагревательного элемента. Для улучшения качества наблюдений включений при проведении экспериментов возникла необходимость в полировке граней кристалла, которая осуществлялась на специально разработанной полировальной установке.

Для формирования свободных жидких микровключений в кристалле KDP из полости с раствором был использован метод термомиграции : путём нагрева мощным резистором одной из граней кристалла в нём создавался градиент температуры, под действием которого полость деформировалась и частично фрагментировалась. На *рис. 1а* представлена микрофотография образовавшейся группы включений.

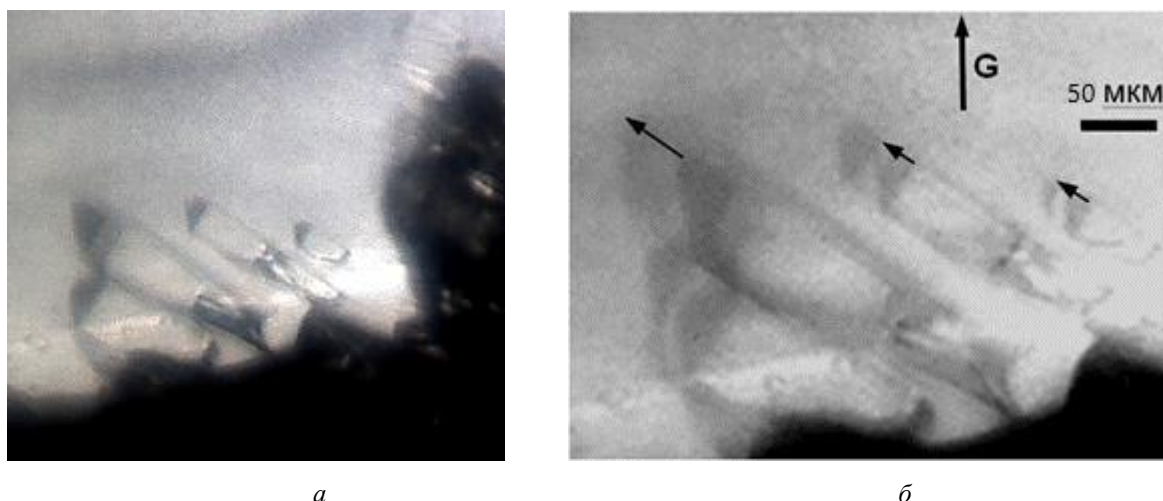


рис.1. Полученная группа включений (а) и их смещение (отмечено стрелками) в результате термомиграции в кристалле KDP в течение 10 часов под действием градиента температуры  $G$  (б)

Исследование миграции созданной группы включений проводилось под действием градиента температуры величиной около 12 К/см. Видеосъемка с помощью цифрового микроскопа показала, что включения действительно перемещаются в кристалле в направлении увеличения температуры, но с некоторым отклонением от направления градиента температуры из-за анизотропии свойств кристалла, прежде всего, анизотропии межфазной кинетики. На рис. 1б представлены фотографии включений в разные моменты времени (с интервалом в 10 часов), наложенные друг на друга для оценки скорости их движения. По сделанным оценкам, скорость термомиграции в рассмотренных условиях составила  $\sim 3$ -5 мкм/ч. Увеличение скорости движения включений возможно за счет повышения градиента температуры, однако такие условия термомиграции требуют дополнительного исследования, поскольку могут приводить к росту вероятности появления механических напряжений и дефектов в кристалле.

Список публикаций:

- [1] Рашкович Л.Н. // Соросовский образовательный журнал. 1996. №3. С. 95.
- [2] Грабовский С.В., Шнайдитейн И.В., Струков Б.А. // Физика твердого тела, 2003. Т. 45. № 3. С. 518.
- [3] Верезуб Н.А., Волошин А.Э., Маноменова В.Л., Простомолотов А.И. // Кристаллография. 2020. Т. 65. № 4. С. 654.
- [4] Леммлейн, Г.Г. // Докл. АН СССР. 1952. Т. 85. № 2. С. 325.
- [5] Anthony T.R. Cline H.E. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 3380.

## Связь непараболической кинетики твердофазных реакций с ростом зерен

**Никифоров Ярослав Александрович**

*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

*Бакланова Наталья Ивановна, д.х.н.*

*[y.nikiforov@g.nsu.ru](mailto:y.nikiforov@g.nsu.ru)*

Явление так называемой аномальной диффузии наблюдается в широком спектре систем, от пористых геологических пород до движения белков в клетках и до аморфных сред. Для нее характерна нелинейная зависимость среднего квадрата смещения частиц от времени,  $\langle x^2 \rangle \sim t^\alpha$  при  $\alpha \neq 1$ . Она объясняется временной эволюцией диффузионной среды и изменением транспортных характеристик частиц во времени. В области химии твердого тела аномальная диффузия проявляет себя в так называемой непараболической кинетике реакций. Такая кинетика характеризуется увеличением толщины слоя продуктов в реакции  $A + B = IL$  по степенному закону  $l = kt^{1/n}$ , где  $n > 2$ , в отличие от обычного диффузионного режима ( $l \sim t^{1/2}$ ) или режима, определяемого скоростью реакции на границе ( $l \sim t$  при  $t \rightarrow 0$ ). В литературе непараболическую кинетику объясняют ростом зерен, происходящим параллельно протеканию химической реакции. Однако на данный момент справедливость данной гипотезы продемонстрирована лишь в частном случае тонкого слоя.

Целью данной работы является установление связи между ростом зерен продукта твердофазной реакции с непараболической кинетикой реакции.

Мы рассматриваем реакцию  $A + B = IL$ , предполагая, что подвижность атомов  $A$  существенно выше подвижности атомов  $B$ . В таком случае,  $A$  является основным диффундирующим компонентом внутри фазы продукта  $IL$ , граница  $A/IL$  остается неподвижной, реакция протекает на границе  $IL/B$ , которая при этом является



подвижной. Кроме того, мы рассматриваем случай диффузионного контроля, при котором концентрации компонентов на границах остаются постоянными, а любой бесконечно малый избыток компонента А на границе  $IL/B$  приводит к мгновенному образованию дополнительного количества фазы  $IL$ . Такая система описывается набором уравнений:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(x, t) \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad 0 \leq x \leq \ell \quad (1)$$

$$\frac{1}{\tilde{V}} \frac{d\ell}{dt} = -D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=\ell} \quad (2)$$

$$C(0, t) = C_{max}, \quad C(\ell, t) = C_{min}, \quad \ell(0) = 0 \quad (3)$$

где  $C$  — концентрация диффундирующего компонента,  $C_{max}$  — концентрация атомов А в фазе  $IL$  на границе  $A/IL$ ,  $C_{min}$  — концентрация атомов А в фазе  $IL$  на границе  $IL/B$ ,  $D$  — коэффициент химической диффузии,  $\ell$  — координата движущейся границы,  $\tilde{V}$  — объем фазы продукта, приходящийся на один атом диффундирующего компонента.

Рост зерен описывается степенным законом:

$$L^m = \kappa t \quad (4)$$

где  $L$  — средний диаметр зерна,  $\kappa$  — константа роста зерен. Влияние размера зерен проявляется при большом вкладе зернограничной диффузии в общий процесс транспорта атомов:

$$D = gD_{GB} + (1 - g)D_B \quad (5)$$

где  $D_{GB}$  — коэффициент зернограничной диффузии,  $D_B$  — коэффициент объемной диффузии,  $g$  — эффективная объемная доля зернограничных областей, обратная пропорциональная среднему диаметру  $L$ . В случае преобладания зернограничной диффузии ( $gD_{GB} \gg D_B$ ) изменение среднего размера зерен продукта приводит к тому, что изменение толщины слоя продуктов подчиняется степенному закону. А именно, если рост зерен описывается уравнением (4), то рост слоя продуктов описывается уравнением  $l \sim t^{1/n}$ , а показатели степени в этих уравнениях связаны соотношением:

$$\frac{1}{m} + \frac{2}{n} = 1 \quad (6)$$

Уравнение (6) также объясняет, почему экспериментально наблюдаемые значения  $n$  находятся в пределах от 2 до 4. Значение  $n = 2$  (обычная диффузия) получается при  $m \rightarrow \infty$ , т. е. отсутствии роста зерен. В свою очередь  $n = 4$  получается при  $m = 2$ , минимальному зафиксированному показателю степени в степенном законе (4), соответствующему нормальному росту зерен.

Полученная теоретическая зависимость (6) также была проверена экспериментально для реакции  $ZrC + 3Ir = ZrIr_3 + C$  при  $1600^\circ\text{C}$ . Полученные кинетические кривые роста зерен и толщины слоя продуктов (рис. 1) позволяют оценить сумму в уравнении (6) как  $(1/m + 2/n) = 1.05 \pm 0.07$ , что согласуется с предложенной теоретической моделью.

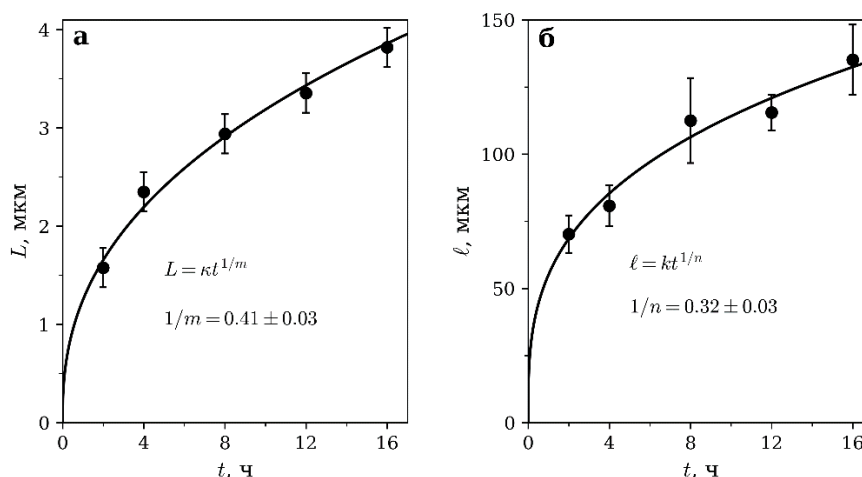


рис. 1 Кинетические кривые для реакции в системе  $ZrC-Ir$  при  $1600^\circ\text{C}$ : а – зависимость среднего размера зерен продукта  $ZrIr_3$  вблизи границы с  $Ir$  от времени; б – зависимость средней толщины слоя продуктов от времени

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-19-00212.



# Исследование электродинамических свойств композитов на основе ОУНТ и графена в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц

Нуриахметов Заур Наилевич<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

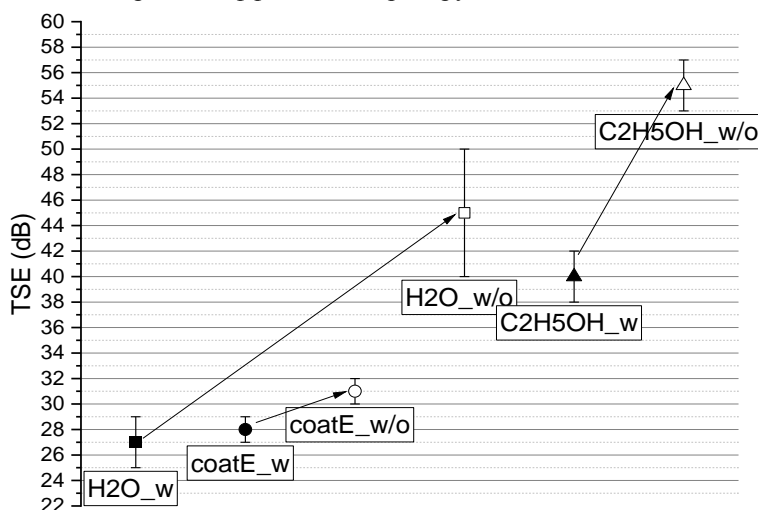
<sup>2</sup>Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН

Черноусов Юрий Дмитриевич, к.т.н.

[zaur.nuriakhmetov@gmail.com](mailto:zaur.nuriakhmetov@gmail.com)

Целью данной работы является исследование свойств ЭМ-экранирования композитов на основе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и графена в S диапазоне СВЧ излучения (2-4 ГГц). Для получения тонких пластин из композита применен метод аэрографического распыления суспензии ОУНТ на подложку с последующим удалением растворителя. Исследованы два вида ОУНТ: с примесями металлических частиц (остатками катализатора синтеза ОУНТ) и без них. Измерены коэффициенты отражения и пропускания плоских пластин в S диапазоне СВЧ. Измерения проводились следующим образом: пластина из исследуемого композита помещалась в поперечном сечении прямоугольного волновода, затем с помощью векторного анализатора измерялись S11 и S21 характеристики, отвечающие за коэффициенты отражения и прохождения соответственно. На основе этих данных было произведено вычисление проводимости композитов используя стандартную TRL методику. В работе также предложена методика измерения проводимости тонких плёнок, основанная на измерении добротности резонатора, часть поверхности которого выполнена из изучаемых пластин. Проведено сравнение результатов измерения проводимостей исследуемых композитов двумя методиками.

Исследуемые композиты обладают высокими значениями коэффициента отражения (сравнимыми с медью) и низкими значениями коэффициента пропускания. На *рис. 1* приведены значения коэффициента ЭМ-экранирования (TSE) для различных образцов композита. Показано, что для достижения максимальной эффективности ЭМ-экранирования рекомендуется использовать очищенные от катализатора ОУНТ, а также растворитель с минимальным поверхностным натяжением и отсутствием ПАВ. Проводимость полученных образцов композитов находится в диапазоне от 0,015 до 0,200 МСм/м. Результаты данной работы могут быть использованы для разработки материалов эффективно экранирующих ЭМ-волны.



*рис. 1 Коэффициент электромагнитного экранирования композитов на основе различных матриц и ОУНТ. Символы w и w/o указывают на наличие или отсутствие металлических примесей в ОУНТ*

## Обработка заэвтектического силумина импульсным электронным пучком с последовательным снижением плотности энергии пучка электронов

*Рыгина Мария Евгеньевна<sup>1</sup>*

*Петрикова Елизавета Алексеевна<sup>1</sup>, Иванов Юрий Федорович<sup>1</sup>, Воробьев Максим Сергеевич<sup>1</sup>, Москвин Павел Владимирович<sup>1</sup>, Прудников Александр Николаевич<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН*

<sup>2</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет*

*L-7755me@mail.ru*

Модификация поверхности концентрированными электронными пучками позволяет производить высокоскоростную кристаллизацию поверхностного слоя образцов различных металлов и сплавов. Формирующаяся субмикро- наноразмерная структура находится в неравновесном состоянии, характеризуется высокими механическими и трибологическими свойствами. Заэвтектический силумин - сплав на основе алюминия, вторым компонентом которого является кремний, имеет высокую коррозионную стойкость, малый удельный вес, из-за высокого содержания кремния (более 12 вес.%) обладает низким коэффициентом термического расширения. Данный сплав является перспективным для изготовления подшипников качения, а также деталей поршневой группы. В свою очередь наличие в структуре заэвтектического силумина кристаллов первичного кремния значительных размеров приводит к охрупчиванию материала и делает невозможным применение данного сплава в исходном состоянии без использования различных легирующих элементов и модифицирующих добавок, приводящих к увеличению стоимости конечного изделия [1].

Исследования образцов заэвтектического силумина, облученных импульсным электронным пучком при различных режимах воздействия выявили кратное увеличение твердости и износостойкости сплава, снижение его прочностных характеристик. Так сплав АК 20, модифицированный импульсным электронным пучком (18 кэВ, (15 - 70) Дж/см<sup>2</sup>, 0,3 с<sup>-1</sup>, 150 мкс, 3 имп. в остаточной атмосфере аргона при давлении 0,02 Па) [2] продемонстрировал, вследствие частичного растворения кристаллов первичного кремния, увеличение твердости сплава более чем в 2,5 раза, износостойкости в 3,9 раза (30-50 Дж/см<sup>2</sup>, 0,3 с<sup>-1</sup>, 150 мкс), при этом временное сопротивление разрыву материала снизилось в 1,3 раза. Данные сканирующей электронной микроскопии показали наличие нерастворившихся кристаллов первичного кремния в приповерхностном слое, расположенных на различной глубине в зависимости от режима модификации, которые являются концентраторами напряжения, снижая характеристики прочности и пластичности. Следует также отметить, что облучение силумина импульсным электронным пучком, независимо от режима воздействия, сопровождается искажением геометрии изделий [3].

Предложен способ модификации поверхности образцов в едином вакуумном цикле многократной обработкой при ступенчатом снижении плотности энергии пучка электронов по схеме (50+30+15+10) Дж/см<sup>2</sup> (0,3 с<sup>-1</sup>, 150 мкс, 3 имп., 0,02 Па), который позволяет сохранить геометрию изделия и произвести полировку облучаемой поверхности. После обработки твердость образцов увеличивается в 1,5 раза по сравнению со сплавом в исходном состоянии. Отметим, что данный способ воздействия обладает хорошей повторяемостью результатов. Последовательность обработки обусловлена постепенным снижением толщины обрабатываемого слоя, тем самым энергия, отводимая в основной объем материала, будет инициировать отпуск нижележащих слоев, приводя к снятию напряжений, возникших при взаимодействии поверхности заэвтектического силумина с импульсным электронным пучком, дополнительно воздействуя на кристаллы первичного кремния и частично их растворяя в основе.

Предлагаемый способ обработки силумина импульсным электронным пучком может быть применен при изготовлении деталей поршневой группы, подшипников скольжения, не приводя к значительному увеличению стоимости конечного продукта.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

Список публикаций:

[1] Иванов Ю.Ф., Ереско С.П., Клопотов А.А., Рыгина М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22. № 2. С. 371.

[2] Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. // Известия вузов. Физика. - 2008. - Т. 51. - № 5. - С. 60-70.

[3] Рыгина М.Е., Петрикова Е.А., Тересов А.Д., Иванов Ю.Ф. // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 248.

# Исследование процесса спекания LiZn феррита, изготовленного методом 3D печати

Свирков Александр Сергеевич

Лысенко Елена Николаевна, Николаев Евгений Владимирович, Власов Виталий Анатольевич

Томский политехнический университет

Лысенко Елена Николаевна, д.т.н.

[svirkov@tpu.ru](mailto:svirkov@tpu.ru)

В последнее время бурно развиваются аддитивные технологии изготовления материалов, которые уже широко используются для изготовления изделий сложной формы из пластмасс, металлов и сплавов. Достижения в области аддитивного производства открывают новые возможности для изготовления керамики, которые могут обеспечить более высокую эффективность и производительность при меньших затратах. Некоторые исследования уже были проведены, и они показали практическую возможность аддитивного получения и использования ферритов на основе NiZn, Sr и Ba [1-5].

Цель настоящей работы заключается в исследовании методом dilatометрии и сканирующей электронной микроскопии процесса спекания ферритовой керамики, полученной аддитивным методом, основанном на экструзионном нанесении ферритовой пасты и последующего высокотемпературного спекания.

В качестве объекта исследования выбран литий-цинковый феррит состава  $\text{Li}_{0.4}\text{Fe}_{2.4}\text{Zn}_{0.2}\text{O}_4$ , который широко используется в электронной технике и биомедицине. Схема спекания ферритовой керамики включает следующие технологические цепочки: синтез феррита твердофазным методом при температуре 900 °С с использованием карбоната лития  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , оксида железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , оксида цинка  $\text{ZnO}$ ; смешение ферритового порошка с оксидом висмута  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (1, 2 вес.%); изготовление ферритовой пасты с определенной вязкостью (феррит/связка в весовом соотношении 80/20) с использованием шаровой мельницы; экструзионное нанесение ферритовой пасты на подложку и формирование образца в виде таблетки определенной толщины; спекание образцов в dilatометре при 1100°С.

В качестве связующего для получения ферритовой пасты в работе использовался раствор этилцеллюлозы в терпинеоле (ЭЦТ). Экструзионная печать пастой проводилась на принтере Voltera V-one. Принцип действия данного принтера основан на непрерывном поршневом дозировании материала через сопло с малым внутренним диаметром. Перемещение поршневого дозатора системой позиционирования по координатам, заданным цифровым файлом, позволял создавать рисунок на поверхности подложки.

Микроструктуру образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000. Исследование процессов усадки образцов в процессе их спекания проводилось при термическом нагреве с помощью высокочувствительного dilatометра Netzsch DIL 402C.

Методом dilatометрического анализа показано, что скорость и температура интенсивной усадки при спекании образцов зависит от концентрации вводимой легкоплавкой добавки в синтезированные ферритовые порошки перед их спеканием. При этом плотность ферритов увеличивается, а пористость уменьшается с увеличением содержания  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в образцах. Результаты исследования СЭМ изображений показали, что наилучшая плотность спеченной ферритовой керамики достигается в случае добавления в ферритовый порошок  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  в количестве 2 вес.%. Относительная плотность таких образцов составила 85.5%. Рентгенофазовый анализ показал, что все спеченные образцы являются монофазным продуктом и соответствуют химической формуле литий-цинковой феррошпинели исследуемого состава.

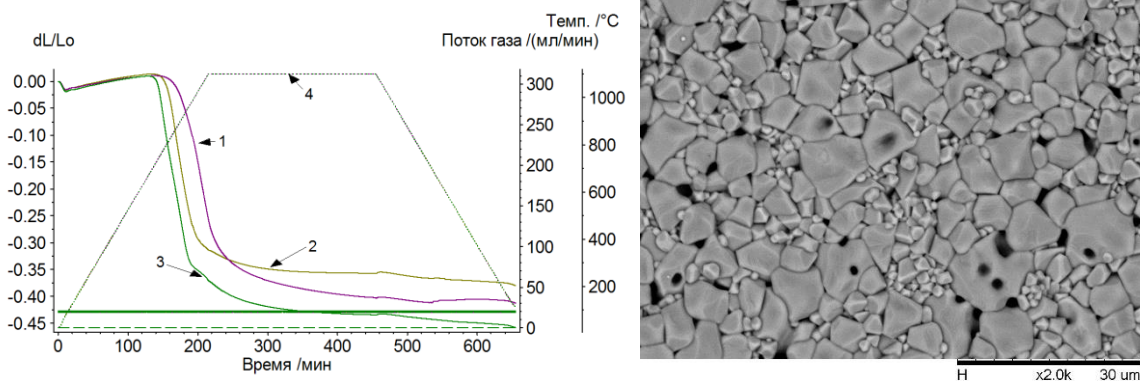


рис.1. Данные dilatометрического и СЭМ анализов

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-19-00183).

Список публикаций:

- [1] An, T. et al. // *Ceramics International*. 2020. V.46. P.6469-6476.  
[2] Bissanagari, M. et al. // *Ceramics International*. 2015. V.41. P.8023-8027.  
[3] Wei, X. et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. 2022. V.42. P.1522-1529.  
[4] Yang, F. et al // *Ceramics International*. 2018. V.44. P.22370-22377.  
[5] Wei, X. et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2020. V.493. P.165664.

## Фотопроводимость графена с наночастицами титана

Сорокин Дмитрий Владимирович

Гареев Тимур Ильясович, Зайцев Олег Валерьевич

Институт теплофизики СО РАН

Сможев Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н.

[d.sorokin@g.nsu.ru](mailto:d.sorokin@g.nsu.ru)

Нулевая ширина запрещенной зоны в графене и независимость величины поглощения света от длины волны в широком спектре делают графен многообещающим материалом в фотонных приложениях [1]. Например, фотоприемники на основе кремния ограничены длиной волны около 900 нм из-за ширины запрещенной зоны 1,1 эВ. Кроме того, однослойный графен демонстрирует высокий коэффициент оптического поглощения ( $7 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ ) в широком диапазоне от 300 до 2500 нм, что значительно выше, чем у обычных полупроводниковых материалов [2]. В то же время двумерная структура графена позволяет управлять его коэффициентом поглощения, варьируя количество слоев или функционализируя его поверхность элементами с различной степенью поглощения света. Это качество двумерного материала открывает многообещающие перспективы для использования графена в различных оптических устройствах, таких как светодиоды, солнечные элементы, фотокатализаторы, биосенсоры и фотоприемники.

Данная работа посвящена изучению фотопроводимости графена, модифицированного наночастицами титана. В литературе выделяют три механизма образования фотопроводимости: фототермоэлектрический, болометрический и фотоэлектрический. Первые два механизма основаны на нагреве графеновых структур внешним излучением. Третий механизм, фотоэлектрический, основан на поглощении электронами в валентной зоне фотонов, и тем самым образовывании электронно-дырочной пары. В результате при приложенной разности потенциалов на контактах возникает изменение проводимости, т. е. разделение полученной электронно-дырочной пары и образования фототока. В данном исследовании эксперименты проводились на графене, синтез которого методом CVD на медной подложке подробно описан в [3]. Далее медь стравливалась и графеновая пленка переносилась на кремний. Проводящие контакты были изготовлены методом магнетронного распыления и состояли из адгезивного слоя титана толщиной 1 нм и слоя меди толщиной 300 нм. Нанесение наночастиц на поверхность графена осуществлялось в режиме импульсного распыления титановой мишени с временами 2, 4, 8 секунд. В результате получена зависимость изменения сопротивления графена при облучении светодиодом от времени распыления титановой мишени. Таким образом, нанесение наночастиц титана методом магнетронного распыления на поверхность графена позволяет повысить его фотопроводимость.

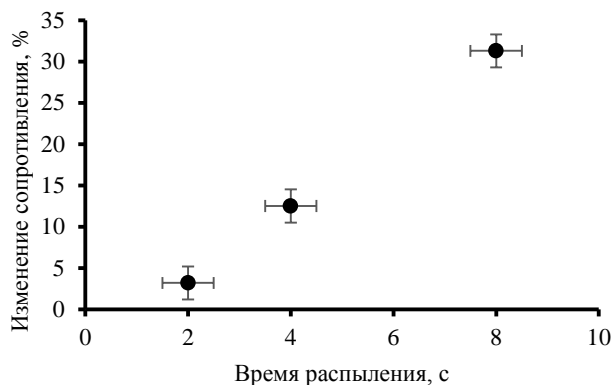


рис.1. Зависимость изменения сопротивления графена от времени распыления наночастиц титана

Список публикаций:

- [1] F. Xia, H. Yan, P. Avouris, *Proceedings of the IEEE*, 101, 1717, (2013).  
[2] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, A. C. Ferrari, *Nature photonics*, 4, 611, (2010).  
[3] I. A. Kostogrud, E. V. Boyko, D. V. Smovzh, *Materials Chemistry and Physics*, 219, 67, (2018).

## Структура и магнитные свойства наночастиц FeNi@C по данным ЯМР и мессбауэровской спектроскопии

Суворкова Екатерина Витальевна

Гермов Александр Юрьевич, Уймин Михаил Александрович, Ермаков Анатолий Егорович  
Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук  
Михалев Константин Николаевич  
[e.v.suvorkova@mail.ru](mailto:e.v.suvorkova@mail.ru)

На протяжении многих лет остаются неясными на локальном уровне процессы магнитного перехода вблизи инварного состояния в железоникелевых сплавах. Традиционные методы исследования материалов, как, например, рентгеновская дифракция, малоэффективны при работе с мелкими наночастицами, поскольку регистрируют только одну основную фазу. В связи с этим в данной работе использовались резонансные методики, а именно: ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и мессбауэровская спектроскопия, позволяющие изучать локальное атомное окружение, напрямую определяя фазовый состав.

Наночастицы Fe<sub>x</sub>Ni<sub>1-x</sub>@C (x=0.25, 0.50, 0.75) были получены газофазным синтезом [1] с использованием проволоки чистого никеля и железа. Часть образцов была подвержена температурному отжигу при T = 400 °C в течение 4 часов с целью получения однородного состава. Все исследуемые частицы имеют средний размер 5 нм, согласно ПЭМ и измерениям удельной поверхности (метод БЭТ). Рентгеноструктурный анализ свидетельствует о ГЦК структуре, которая также подтверждается кольцевой дифракцией электронной микроскопии. Кривые намагничивания соответствуют суперпарамагнитному состоянию с температурой блокировки ниже комнатной. Также для сравнения были изучены аналогичные наночастицы без углеродной оболочки размером 21 нм.

Были получены спектры ЯМР <sup>57</sup>Fe, <sup>61</sup>Ni в локальном поле при T = 4.2 K и мессбауэровские спектры <sup>57</sup>Fe при комнатной температуре в трансмиссионной геометрии, в том числе в поле H = 6 кЭ. В модели, учитывающей только первую координационную сферу из 12 атомов, сверхтонкие поля определяются следующим образом [2,3]:

$$H_{Ni} = a\mu_{Ni} + b\bar{\mu}(c), \quad (1)$$

где  $\mu_{Ni}$  – магнитный момент атома никеля,  $a = -16.7$  кЭ/ $\mu_B$  и  $b = -118.7$  кЭ/ $\mu_B$  – коэффициенты, определенные с учетом данных ЯМР, а  $\bar{\mu}(c)$  – средний магнитный момент при концентрации  $c$  никеля:

$$\bar{\mu}(c) = c\mu_{Ni} + (1 - c)\mu_{Fe}. \quad (2)$$

Сверхтонкие поля на железе определяются аналогичным образом с коэффициентами  $a = -80$  кЭ/ $\mu_B$  и  $b = -75$  кЭ/ $\mu_B$ . В диапазоне от 5 до 12 атомов никеля в ближайшем окружении в простом приближении магнитные моменты никеля и железа считаем постоянными и равными  $0.6 \mu_B$  и  $2.7 \mu_B$  соответственно. При понижении концентрации никеля менее ~50% средний магнитный момент сплавов FeNi демонстрирует отклонение от кривой Слейтера-Полинга, в связи с возникновением антиферромагнитного взаимодействием между атомами железа.

Обычно при концентрациях никеля менее ~30% в сплавах FeNi реализуется ОЦК структура, что наблюдается в более крупных исследуемых образцах без углеродной оболочки Fe<sub>0.75</sub>Ni<sub>0.25</sub> и в литературных данных, однако наночастицы Fe<sub>0.75</sub>Ni<sub>0.25</sub>@C имеют ГЦК структуру. Это связано с внедрением атомов углерода из оболочки, а также, возможно, наноразмерностью, как, например, в случае кобальта, в котором при переходе к наномасштабам становится предпочтительней ГЦК, а не ГПУ структура, согласно прошлым экспериментальным данным. Полученные значения сверхтонких полей также превышают литературные значения, ввиду однодоменности частиц, за счет вклада размагничивающего поля.

Анализ результатов комплекса методов показал, что наночастицы всех составов представляют собой неоднородные неупорядоченные сплавы. В соответствии с данными ЯМР, исходные составы содержат небольшое количество карбидов железа, которые распадаются после отжига, и выделившийся углерод, по всей видимости, выходит из ядра частиц и включается в оболочку. Упорядоченный сплав в составе частиц при помощи отжига получить не удалось. Помимо этого, при комнатной температуре значительная доля частиц находится в суперпарамагнитном состоянии, о чем свидетельствует мессбауэровская спектроскопия.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Функция», Г.р.№ 122021000035-6).

Список публикаций:

- [1] Tsurin V. A. et al. // *Physics of the Solid State*. 2014. Т. 56. №. 2. С. 287.
- [2] Покатилов В. С. и др. // *Докл. АН СССР*. 1978. Т. 238. №. 6. С. 1336.
- [3] Erich U. et al. // *Journal of Applied Physics*. 1969. Т. 40. №. 3. С. 1491.

## Получение и исследование двумерных систем на основе наночастиц золота

Царенко Андрей Васильевич

Сибирский федеральный университет

Лукьяненко Анна Витальевна, к.ф.-м.н.

[tsarienko.2001@mail.ru](mailto:tsarienko.2001@mail.ru)

В данной работе представлено получение планарных систем на основе самоорганизованных двумерных массивов наночастиц (НЧ) золота. В таких двумерных системах могут наблюдаться локализованные поверхностные плазмоны, т.е. колебания свободных электронов вблизи проводящей поверхности. Такие системы сейчас широко начинают использоваться в таких областях и устройствах, как фотоэлектрические элементы, плазмонные лазеры, биомедицинские и телекоммуникационные приложения и др [1]. Особенно важно применение локализованных поверхностных плазмонов в биосенсорах, что обусловлено высокой чувствительностью частоты плазмона к диэлектрической проницаемости химической среды, окружающей наноструктуру. Большая часть биосенсоров на наличие разнообразных белковых и иных молекул, построены на основе локализованных поверхностных плазмонов. Наличие канала проводимости между металлическими наночастицами приводит к появлению плазмонов с переносом заряда (ППЗ), при котором заряды периодически перемещаются между наночастицами по проводящему каналу. Из-за наличия конечного расстояния между наночастицами и движения носителей между ними по узкому каналу частота ППЗ плазмонов обычно лежит в ИК или терагерцовой области. Применения ППЗ в биосенсорах ИК диапазона является перспективным, так как такое излучение, в отличие от видимого диапазона, может глубоко проникать в биологические ткани. Кроме того, фотоповреждения клеток и тканей в ИК (или терагерцовом диапазоне) несравненно меньше по сравнению с видимым диапазоном.

С помощью химического синтеза [2] были получены системы, состоящие из одиночных наночастиц (НЧ) в воде. В ходе простого одностадийного процесса разложения водного раствора золотосодержащей кислоты  $\text{HAuCl}_4$  под действием цитрата натрия ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ ) были получены Au НЧ. Когда температура синтеза поддерживалась в районе  $100^\circ\text{C}$  образовывались наночастицы диаметром 21,4 нм. Точный размер и форма синтезированных Au наночастиц были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

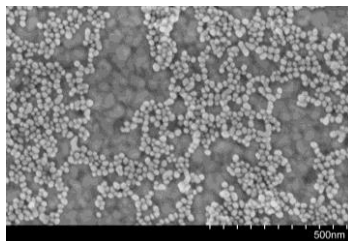


рис. 1. СЭМ – изображение золотых наночастиц на подложке Au/Si(100)

Были получены упорядоченные массивы из НЧ Au на слоях золота, осаждённого на кремниевую подложку (Au/Si(100)), тонкая плёнка золота была получена физическим осаждением. Осаждение НЧ на подложку происходило по методу схожему с методом Ленгмюра-Блоджетт, он также использует самоорганизацию и образование монослоя наночастиц на поверхности раздела двух сред [3]. Формировалась плёнка из Au НЧ на границе раздела воздух-жидкость и переносилась на подложку Si, покрытую Au. Для формирования слоя частиц, предварительно, коллоидный раствор частиц выпаривался в сушильном шкафу в течение 4 часов при температуре  $T = 50^\circ\text{C}$ . Для характеристики полученных Au НЧ на подложке Au/Si были использованы методы АСМ (рис.2) и СЭМ (рис.1). Как видно из СЭМ (рис.1) поверхность полученной подложки имеет большую зернистость, что приводит к неравномерному распределению золотых НЧ по поверхности. Это связано с тем, что подложка (Au/Si) была получена магнетронным осаждением. Из АСМ данных было определено, что из-за морфологии подложки некоторые НЧ ложатся 2-ым слоем, а относительная общая площадь, занимаемая Au НЧ составляет  $S_{\text{отн}} \sim 85 - 90\%$ .

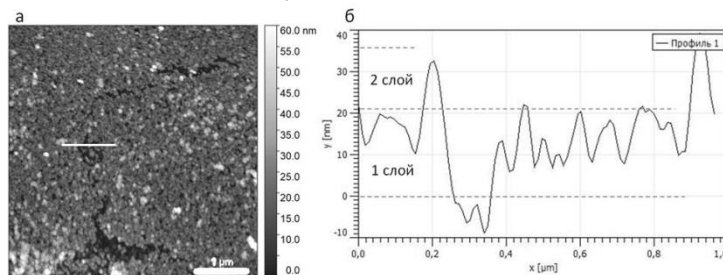


рис.2 а) АСМ-изображение наночастиц на подложке Au/Si, и б) профиль сечения

Также было снято несколько оптических спектров отражения (рис.3). Спектры снимались из разных областей образца (1,2,3,4) так как при осаждение НЧ золота на подложку полученный слой НЧ на поверхности подложки распределялся неравномерно, и образовались области с разным удельным количеством НЧ золота. В местах снятия спектра также были сделаны оптические снимки поверхности, данные снимки по своему виду хорошо согласуются с данными СЭМ (рис.1). Из полученных изображений было найдено, что относительная общая площадь, занимаемая Au НЧ, составляет  $S^1_{\text{отн}} \sim 80\%$ ,  $S^2_{\text{отн}} \sim 42\%$ ,  $S^3_{\text{отн}} \sim 6\%$ , а в области 4 золотых НЧ не было совсем ( $S^4_{\text{отн}} = 0\%$ ) и оптический спектр соответствует Au плёнке [4]. Из полученных данных можно увидеть постепенную эволюцию спектра. Видно, что вид спектра коррелирует со значением относительной общей площади, занимаемой НЧ.

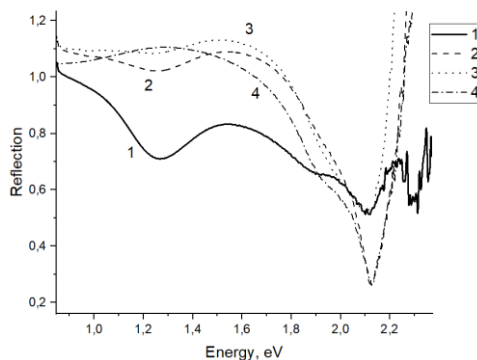


рис.3 Оптический спектр отражения, где 1,2,3,4 обозначают области, в которых были сняты спектры

Таким образом, в данной работе представлен метод получения двумерных систем на основе наночастиц золота, которые могут обладать ППЗ. Для полученной планарной системы были получены данные с АСМ, СЭМ, оптические спектры отражения. Были найдены относительная общая площадь, занимаемая Au НЧ, для различных мест полученной двумерной системы, так как полученная пленка золотых НЧ, осаждалась неравномерно из-за метода получения подложки. Также была представлена корреляция оптических спектров отражения от  $S_{\text{отн}}$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 23-12-2007, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-исследовательской деятельности, соглашение № 256.

#### Список литературы:

- [1] Fedorov A. S. et al. //The Journal of Chemical Physics. 2024. Т. 160. №. 8.
- [2] Дыкман Л. А., Богатырев В. А. //Успехи химии. 2007. Т. 76. №. 2. С. 199-213.
- [3] Guo Q. et al. //Langmuir. 2016. Т. 32. №. 18. С. 4530-4537.
- [4] Babar S., Weaver J. H. //Applied Optics. 2015. Т. 54. №. 3. С. 477-481.

## 17 - Радиофизика. Электроника

Амонский Дмитрий Сергеевич, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Электродинамический анализ и синтез волноводного фильтра**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [dmitryamonsky@yandex.ru](mailto:dmitryamonsky@yandex.ru) стр. 270

Ба Мамаду, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Разработка веб-сервера (загрузка и скачивание файлов) на основе ESP8266 с модулем SD-карты**  
Орлов Сергей Валентинович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [mamadu@sfedu.ru](mailto:mamadu@sfedu.ru) стр. 271

Бармин Никита Михайлович, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Технология SDR в современных системах связи**  
Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [nbarmin@sfedu.ru](mailto:nbarmin@sfedu.ru) стр. 273

Букин Сергей Павлович, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Электродинамический анализ и синтез узкополосного квазиэллиптического фильтра третьего порядка, выполненного с использованием SIW-технологии**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [sbukin@sfedu.ru](mailto:sbukin@sfedu.ru) стр. 275

Виноградова Елизавета Владимировна, ассистент  
Владимир, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, институт информационных технологий и электроники  
**Исследование потенциальных дефектов КМОП ИМС с помощью измерительно-вычислительного комплекса на базе спектрометра DLS-82E**  
Крылов Владимир Павлович, д.т.н.  
e-mail: [tikhonravova.elizaveta@mail.ru](mailto:tikhonravova.elizaveta@mail.ru) стр. 276

Горбачев Никита Васильевич, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Разработка время-цифрового преобразователя на основе ПЛИС**  
Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ngorbachev@sfedu.ru](mailto:ngorbachev@sfedu.ru) стр. 278

Гриздуб Алексей Николаевич, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Квазиэллиптический полосно-пропускающий SIW-фильтр**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [agrizodub@sfedu.ru](mailto:agrizodub@sfedu.ru) стр. 279

Друженков Артём Владимирович, 2 курс  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем  
**Исследование магнитоэлектрического датчика деформаций**  
Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [druzhnikovav@gmail.com](mailto:druzhnikovav@gmail.com) стр. 281

Коноплев Артем Александрович, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Моделирование диаграммообразующих устройств оптического диапазона**  
Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [akonoplev@sfedu.ru](mailto:akonoplev@sfedu.ru) стр. 282



Кривцов Владимир Георгиевич, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Разработка устройства для аудита беспроводных сетей Wi-Fi, работающего совместно с Android-смартфоном**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [vlkrivcov@sfedu.ru](mailto:vlkrivcov@sfedu.ru) стр. 283

Кутилов Иван Инновентьевич, магистрант 2 года обучения  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем  
**Разработка автоматизированной оснастки для испытаний источников питания**  
Петров Владимир Михайлович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [sos11132@yandex.ru](mailto:sos11132@yandex.ru) стр. 283

Миназов Ильнур Ильшатovich, 2 курс  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт  
**Разработка прототипа шагающего марсохода на базе AVR**  
e-mail: [ihnuruunit@gmail.com](mailto:ihnuruunit@gmail.com) стр. 284

Мошиченко Сергей Дмитриевич, 6 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Методы компенсации погрешности «walk error» времяпрелётного лидера с время-цифровыми преобразователями**  
Клещенков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [su\\_fullback@mail.ru](mailto:su_fullback@mail.ru) стр. 286

Огурцов Евгений Сергеевич, магистрант 2 года обучения  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем  
**Разработка десятиканального источника тока для гальванического осаждения**  
Петров Владимир Михайлович, д.ф.-м.н.  
e-mail: [oes7076@yandex.ru](mailto:oes7076@yandex.ru) стр. 287

Павленко Михаил Андреевич, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающих фильтров на тонких диафрагмах со ступенчатым вырезом**  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [mpavlenko@sfedu.ru](mailto:mpavlenko@sfedu.ru) стр. 288

Пандов Даниил Дмитриевич, 2 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Спектры поглощения СВЧ энергии композитами, содержащими сегнетоэлектрик**  
Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [dan.pandov@mail.ru](mailto:dan.pandov@mail.ru) стр. 289

Попов Михаил Дмитриевич, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Расчёт погрешностей схемы генератора тестовых сигналов для электрокардиографов и кардиомониторов**  
Орлов Сергей Валентинович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [mikhail.d.popov@gmail.com](mailto:mikhail.d.popov@gmail.com) стр. 291

Саблин Михаил Сергеевич, магистрант 1 года обучения  
Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, институт наукоемких технологий и передовых материалов  
**Разработка антенного устройства для комплекса устройств на базе технологии LoRa**  
Полянский Дмитрий Александрович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [michaelsablin5@gmail.com](mailto:michaelsablin5@gmail.com) стр. 292

Сабурова Валерия Сергеевна, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Самоподавление паразитного режима более высокого порядка в фильтре, выполненном по SIW технологии**

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [lera.saburova.18@mail.ru](mailto:lera.saburova.18@mail.ru) стр. 294

Садыков Раиль Расимович, магистрант 1 года обучения  
Уфа, Уфимский университет науки и технологий, физико-технический институт  
**Самобалансирующий робот**

Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [rail40981@gmail.com](mailto:rail40981@gmail.com) стр. 295

Уварова Виталина Андреевна, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Полосовой фильтр с входным поглощающим резонатором квазиэллиптического типа**

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [yiuvarova@sfedu.ru](mailto:yiuvarova@sfedu.ru) стр. 297

Филипченко Елизавета Станиславовна, магистрант 2 года обучения  
Великий Новгород, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, институт электронных и информационных систем  
**Исследование возможности применения токопроводящего клея для монтажа активных бескорпусных элементов**

e-mail: [povarova.elizaveta@mail.ru](mailto:povarova.elizaveta@mail.ru) стр. 298

Черкасов Петр Витальевич, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Выбор антенны для приема ионограмм на трассах наклонного ЛЧМ зондирования**

Вертоградов Геннадий Георгиевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [pcherkasov@sfedu.ru](mailto:pcherkasov@sfedu.ru) стр. 299

Шевченко Андрей Константинович, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Резонаторный диплексор Ku-диапазона**

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ash@sfedu.ru](mailto:ash@sfedu.ru) стр. 301

## Электродинамический анализ и синтез волноводного фильтра

Амонский Дмитрий Сергеевич  
Южный федеральный университет  
Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
[dmitryamonsky@yahdex.ru](mailto:dmitryamonsky@yahdex.ru)

Требования, предъявляемые к современным СВЧ устройствам очень высокие – малые массо-габаритные размеры, малая цена производства, надёжность при сохранении таких параметров как малые потери, высокая добротность, полностью экранированная структура и высокая передаваемая мощность. Одним из известных способов борьбы с узким рабочим диапазоном частот является переход от волноводов простого сечения (круглых и прямоугольных) к волноводам со сложной формой поперечного сечения. Известно, что применение таких волноводов позволяет уменьшать поперечные размеры устройства примерно на 20% и увеличивать рабочий диапазон частот до двух и даже трёх раз по сравнению с простыми волноводами, однако продольный размер устройств остаётся при этом практически без изменений, поскольку определяется рабочей частотой и соответствующей длиной волны в волноводе. Применение объёмных резонаторов, как основных базовых элементов волноводных частотно-селективных устройств, приводит к тому, что продольный размер фильтров оказывается равным, а для многорезонаторных – в разы превышающим длину волны. Таким образом, существующие на сегодняшний момент массогабаритные характеристики волноводных частотно-селективных элементов и устройств существенно ограничивают их применение в бортовых, особенно авиационных и спутниковых инфокоммуникационных системах, а также в телекоммуникационных системах связи нового поколения 5G [1-5].

Настоящая работа посвящена электродинамическому анализу и синтезу волноводного фильтра сечением  $23 \times 10$  мм. В ходе исследований в высокопроизводительном пакете программного обеспечения для электромагнитного анализа CST Studio Suite были созданы модели фильтров с различными неоднородностями. Синтезированные фильтры, имеют в своей структуре ёмкостные диафрагмы и пару цилиндрических штырей. Отличия в фильтрах заключается в расположении резонансных штырей на одной плоскости или на разных, что дает возможность для получения слева и справа от полосы пропускания образования нулей передачи. В работе показан анализ зависимости АЧХ от геометрических размеров отдельных элементов конструкции фильтра.

На *рис.1(a,б)* показаны чертежи и расположение резонансных штырей с размерами  $a=22.83$  мм,  $b=10.16$  мм,  $c1=38.32$  мм,  $r=3.4$  мм,  $l1=3.97$  мм,  $w=1$  мм,  $h11=7.16$  мм,  $h21=5.89$  мм,  $c2=36.98$  мм,  $l2=6.1$  мм,  $h21=8.79$  мм,  $h22=5.86$  мм соответственно. Трёхмерные модели волноводных фильтров показаны на *рис.2(a,б)* соответственно. Амплитудно-частотные характеристики приведены на *рис.3(a,б)* соответственно.

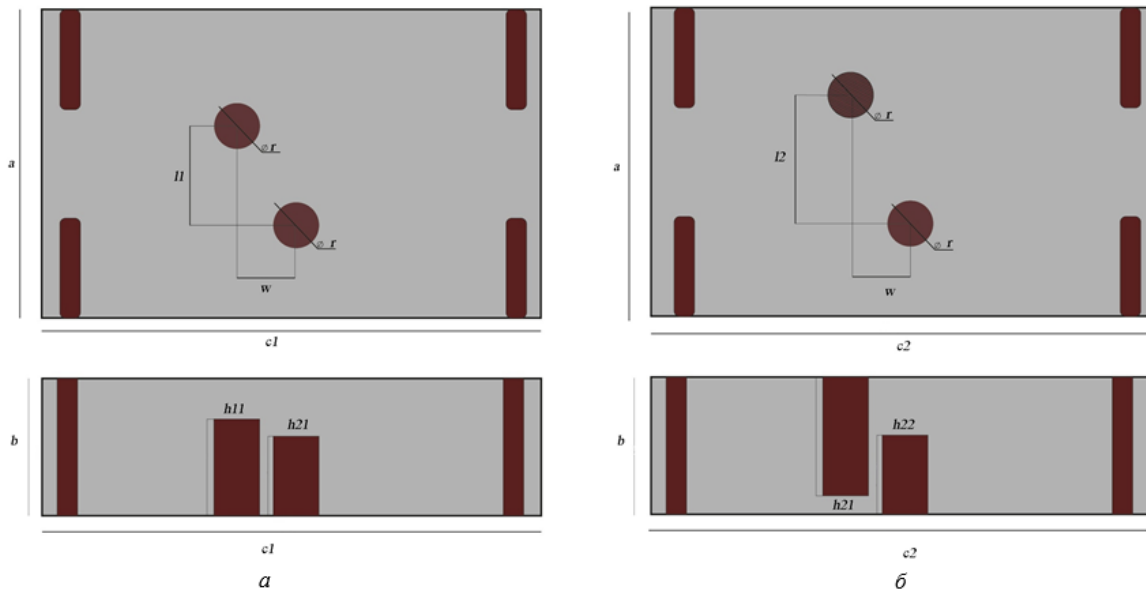


рис.1. Чертёж фильтра при расположении резонансных штырей на одной широкой стенке волновода (а) и на противоположных широких стенках волновода (б)

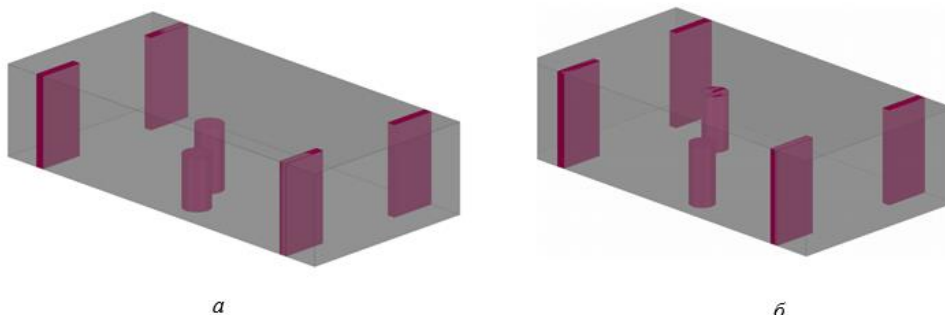


рис.2. 3D модель фильтра при расположении резонансных штырей на одной широкой стенке волновода (а) и на противоположных широких стенках волновода (б)

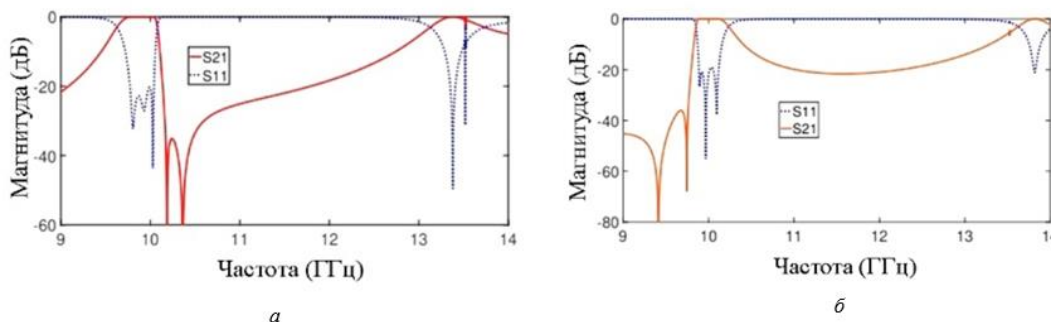


рис.3. Зависимость коэффициента передачи ( $|S_{21}|$ ) и отражения ( $|S_{11}|$ ) от частоты фильтра при расположении резонансных штырей на одной широкой стенке волновода (а) и на противоположных широких стенках волновода (б)

В ходе работы показана возможность создания фильтров с одним нулём передачи из простых резонансных элементов. Данная работа даёт возможность создания полосно-пропускающего фильтра с нулями передачи с двух сторон от полосы пропускания.

Список публикаций:

- [1] Muhammad Y. Sandhu [et al] // 2022 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO)
- [2] Krutiev S.V. [et al] // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)
- [3] Krutiev S.V. [et al] // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)
- [4] Zemlyakov V.V. [et al] // Radiophysics and Quantum Electronics. 2019. 61(12).915–923
- [5] Zemlyakov V.V. [et al] // International Journal of Circuit Theory and Applications. 2019. 47(1). 55–64.

## Разработка веб-сервера (загрузка и скачивание файлов) на основе ESP8266 с модулем SD-карты

**Ба Мамаду**

Южный федеральный университет

Орлов Сергей Валентинович, к.ф.-м.н.

[mamadu@sfedu.ru](mailto:mamadu@sfedu.ru)

В современном мире интернет-связанное устройство является чрезвычайно востребованным решением для создания различных проектов, от умного дома до промышленной автоматизации. В этом контексте ESP8266, мощный и компактный микроконтроллер с встроенным модулем Wi-Fi [1] [2], занимает особое место, предоставляя разработчикам доступ к беспроводным сетям по доступной цене. Однако, когда речь идет о разработке веб-приложений, особенно связанных с обработкой файлов, возникают особые вызовы.

В данной статье рассматривается процесс создания веб-сервера на основе ESP8266 с использованием модуля SD-карты [3]. Этот проект позволяет не только управлять устройством через Wi-Fi, но и осуществлять загрузку и скачивание файлов с помощью веб-интерфейса. Использование SD-карты расширяет возможности хранения данных и открывает новые перспективы для создания приложений, требующих обработки и хранения больших объемов информации.»

Разработка части пользовательского интерфейса

Для разработки части пользовательского интерфейса были использованы языки программирования: html, css и JavaScript на среде разработки Visual Studio code.

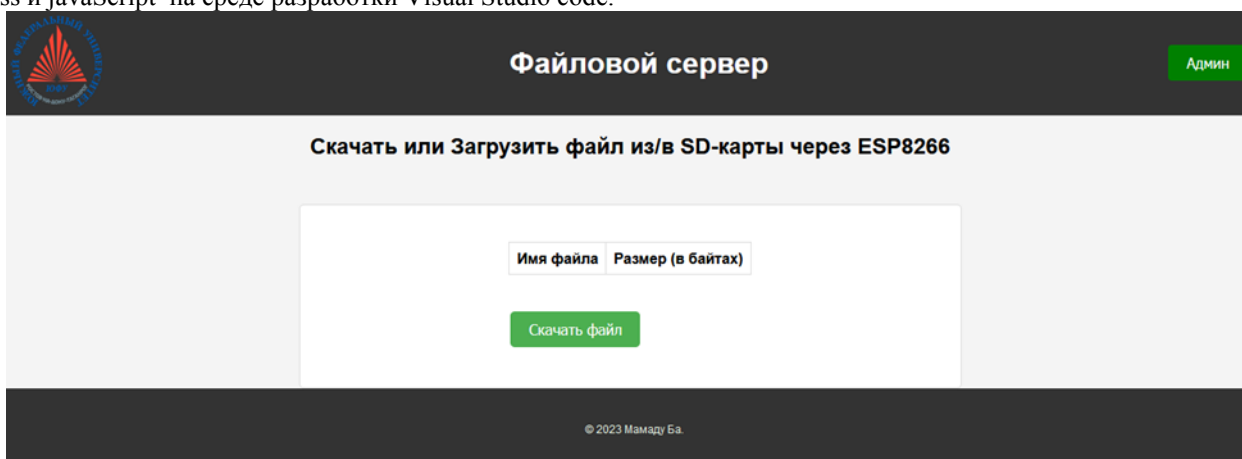


рис.1. часть пользовательского интерфейса

На части пользовательского интерфейса была реализована веб-страница, которая состоит из раздела заголовки, раздела содержания и раздел нижнего колонтитула. Раздела заголовки состоит из логотипа, названия веб-сайта и кнопки для входа в режим администратора веб-сервера. Раздела содержания состоит из следующих части: тема проекта, колонка имена файлов, колонка размера каждого файла, кнопка для скачивания файлов. При нажатии на кнопку “Админ” открывается окно для аутентификации администратора. После успешной аутентификации открывается страница для администратора, в которой реализована возможность выбора и загрузки файлов. Раздел нижнего колонтитула состоит из авторского права (Ба Мамаду),

#### Разработка серверной части

Для реализации серверной части были решены следующие задачи: создание беспроводной точки доступа на ESP8266 [4], размещение всех файлов и логотипа пользовательской части в файловую систему ESP8266 NodeMCU с помощью плагина LittleFS [5], создание веб-сервера с использованием библиотеки ESPAsyncWebServer [6], которая обеспечивает простой способ создания асинхронного веб-сервера, реализация системный алгоритм передачи информации о содержании SD-карты из серверной части на пользовательскую часть интерфейса с помощью библиотек ArduinoJson и WebSocket [7][8], разработка функционала скачивания файлов из SD-карты, разработка алгоритма загрузки файлов на SD-карту, реализация системы аутентификации для получения доступа к серверу и также обеспечение функционала, указывающий на активности разработанного устройства.

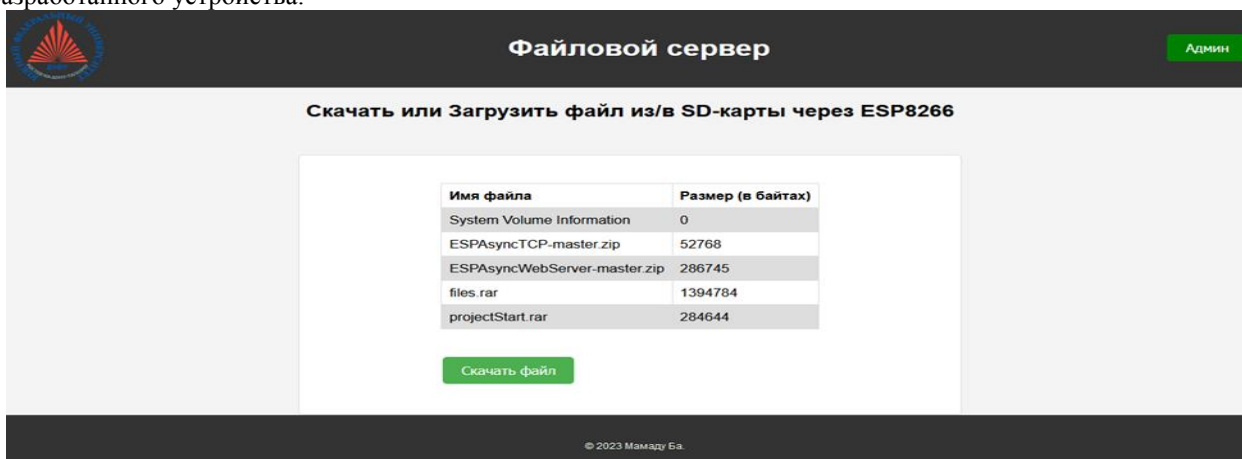


рис.2. часть пользовательского интерфейса при реализации серверной части

#### Заключение

Разработан веб-сервер на основе ESP8266 NodeMCU Mini с использованием модуля SD-карты. Создан пользовательский интерфейс на HTML, CSS и JavaScript, а серверная часть выполнена с применением библиотек Arduino IDE. Устройство позволяет загружать и скачивать файлы, имеет функции аутентификации и индикации работы устройства. Проект также успешно собран на макетной плате. можно подчеркнуть практическую значимость разработки, выделяя возможное применение в создании локальной библиотеки методических материалов. Такая библиотека способна оперировать без доступа в интернет, обеспечивая

надежное хранение и удобный доступ к необходимым ресурсам. Это особенно полезно в условиях, когда подключение к сети недоступно или требует дополнительных разрешений. Такое приложение может быть актуальным, например, для образовательных учреждений или предприятий с ограниченным интернет-доступом, где важна локальная и независимая работа с методическими материалами. Для использования устройства необходимо подключиться к нему через Wi-Fi и ввести соответствующий IP-адрес в браузере.

Список публикаций:

- [1] *Makerfab, Usage of the NodeMCU Mini*: <https://www.makerfabs.com/desfile/files/NodeMCU%20Mini%20v1.0%20user%27s%20manual.pdf>.  
 [2] *ESP8266 Technical Reference*: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266\\_technical\\_reference\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266_technical_reference_en.pdf).  
 [3] *SD-card documentation* : <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/sd/>.  
 [4] *ESP8266WiFi library*: <https://arduino-esp8266.readthedocs.io/en/latest/esp8266wifi/readme.html>.  
 [5] *Uploading files to file system*: <https://arduino-esp8266.readthedocs.io/en/latest/filesystem.html>.  
 [6] *ESPAsyncWebServer*: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncWebServer>.  
 [7] *ArduinoJson* : <https://github.com/bblanchon/ArduinoJson>.  
 [8] *ArduinoWebSockets* : <https://github.com/Links2004/arduinoWebSockets>.

## Технология SDR в современных системах связи

*Бармин Никита Михайлович*

*Южный федеральный университет*

*Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.*

*[niki.barmin@yandex.ru](mailto:niki.barmin@yandex.ru)*

Программно определяемая радиосистема (ПОР или SDR) – это приемопередатчик радиосигнала, который с помощью программного обеспечения может изменять радиочастотные параметры, такие как: диапазон частот, типы модуляции, выходные мощности, производить обработку сигнала в программе на ПЭВМ и т.д. В основе таких устройств лежит ПЛИС или система на кристалле System on Chip (SoC), служащие для предварительной обработки и преобразования оцифрованного радиосигнала в пакеты Ethernet, USB и т.д. Применение ПЛИС или SoC позволяет реализовывать высокопроизводительные и высокоскоростные устройства цифровой обработки сигналов за счет изменения в заложенных в устройства алгоритмов с возможностью дальнейшей модификации без изменения в аппаратной части платформы. Технология SDR позволяет заменить большое разнообразие существующих и разрабатываемых конструкций радиоприемников, трансиверов и любительский радиосистем, которые обычно строятся по супергетеродинной схеме, на устройство, в котором будет ограниченное число доступных аппаратных блоков, работающих и изменяемых под управлением разработанной программном обеспечении. Это приводит к упрощенной и достаточно дешевой конструкции, улучшению характеристик, возможности использовать различных типов модуляции и т.д.

В ходе выполнения работы был проведен поиск материалов о современном использовании технологии SDR. Стоит отметить, что программно – определяемые радиосистемы применяют в самых разных областях науки и техники. Это стало доступным благодаря достаточно обширному выбору уже готовых цифровых радиоприемников (в таблице ниже).

	RTL-SDR	Adalm Pluto	HackRF one	Lime SDR	USRP N300	USRP N321
Диапазон частот	88 МГц – 130 МГц	325 МГц – 3.8 ГГц	1 МГц – 6 ГГц	100 кГц – 3.8 ГГц	10 МГц – 6 ГГц	3 МГц – 6 ГГц
Полоса частот	3.2 МГц	20 МГц	20 МГц	61.44 МГц	100 МГц	200 МГц
Разрядность АЦП/ЦАП	8 бит	12 бит	8 бит	12 бит	16 бит / 14 бит	12 бит / 16 бит
Режим работы	Только прием	Полудуплекс Полнодуплекс	Полудуплекс	Полудуплекс	Полнодуплекс	Полнодуплекс
Радиочип	RTL2832U	AD9363	MAX5864	Altera Cyclone IV	ARM Cortex-A9	ARM Cortex-A9
Цена	10\$	150\$	300\$	250\$	11600\$	23100\$

Современными областями использования SDR – платформ являются: прием и передача сигналов различных стандартов беспроводной связи, такие как GSM, Wi-Fi, прием цифрового телевидения стандарта DVB, Отслеживание положения морских и воздушных судов, прослушивание радио, Спектральный анализ, Радары, пеленгация источников радиоизлучений. Рассмотрим варианты применения SDR приемо-передатчиков в различных системах связи. На *рис. 1* изображены возможности радиомодема, построенного по технологии SDR.

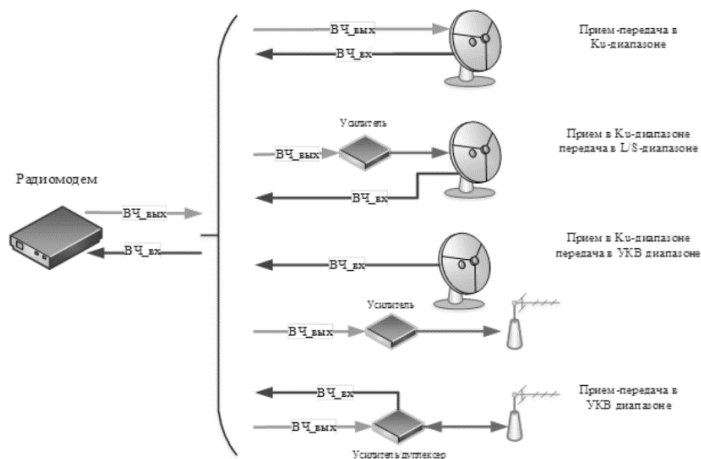


рис 1. Радиомодем и набор антенн для работы в различных частотных диапазонах

Радиомодем способен организовывать связь по модульному принципу, что означает осуществление приема и передачи информации в зависимости от подключаемого оборудования. Это является одним из основных преимуществ применения технологии SDR в системах связи. Например, составляющими этой системы могут быть: приемопередающая малогабаритная антенна Ку-диапазона, приемная антенна Ку-диапазона, модуль приемопередающий УКВ диапазона, с направленной антенной, модуль УКВ диапазона с направленной антенной, модуль приемопередающий L/S/C – диапазона с направленной антенной, модуль передающий L/S/C – диапазона с направленной антенной.

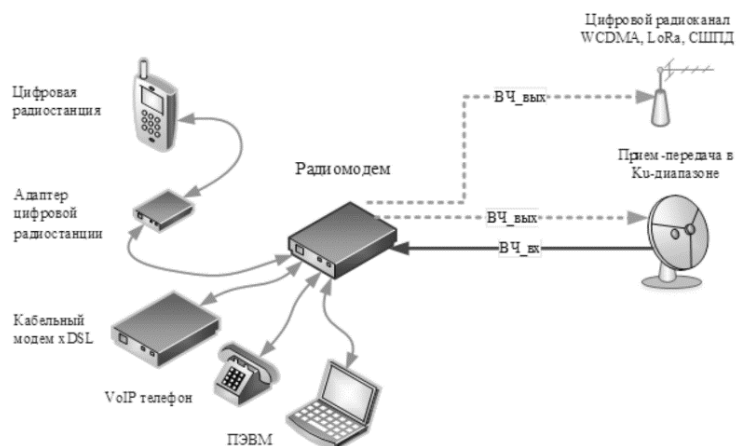


рис 2. Комплект оборудования для организации полевого узла связи

При организации полевого узла связи (рис. 2) SDR радиомодем может осуществлять роль многозадачного коммутатора: путем подсоединения соответствующего оборудования будет осуществляться вывод информации на ПЭВМ, цифровую радиостанцию, передачу голоса по VoIP телефону, вывод цифровых данных.

Таким образом, в современных системах связи применение технологии SDR позволяет усовершенствовать или заменить разнообразие существующих и разрабатываемых конструкций радиоприемников и трансиверов, как серийных, так и любительских, построенных по сложным супергетеродинным схемам на ограниченное число доступных аппаратных блоков, работающих под управлением разрабатываемого сообществом ПО. Это приводит к упрощению и удешевлению конструкций, существенному улучшению характеристик, поддержке любых видов модуляции, а также ускорению разработки ПО под определенные цели. Но технология SDR не ограничена только построением сложных систем связи. Она также позволяет с помощью не дорогих приемников внедриться в мир радиосвязи пользователям, не сталкивающимся с радиоаппаратурой прежде ввиду дружелюбных для начинающих пользователей программного обеспечения, не сложной конструктивной базы и подстраиваемой системы под различные задачи.

Список публикаций:

- [1] Фрэнк Бруно. // Программирование FPGA для начинающих. – М.: ДМК Пресс, 2022. 304 с.: ил.
- [2] Галкин В. А. // Основы программно-конфигурируемого радио. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 372 с., ил.
- [3] Скляр Б. // Цифровая связь. Теоретические основы и практические применение. – М.: «Вильямс», 2003. 1104 с.: ил

# Электродинамический анализ и синтез узкополосного квазиэллиптического фильтра третьего порядка, выполненного с использованием SIW-технологии

Букин Сергей Павлович

Крутыев Сергей Владимирович

Южный федеральный университет

Крутыев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

[sbukin@sfedu.ru](mailto:sbukin@sfedu.ru)

В настоящее время к СВЧ-устройствам предъявляются высокие требования – малые массогабаритные размеры, низкая стоимость изготовления, малые потери на распространение, высокая добротность, высокая передаваемая мощность. Одними из самых востребованных устройств являются волноводные полосно-пропускающие фильтры, которые пользуются большим спросом в системах радиолокации, наземных и спутниковых радиосистемах, в системах сотовой мобильной связи и прочих. Современные технологии производства интегральных схем позволяют интегрировать в них волноводную структуру, которая создается двумя рядами металлических штырей, соединяющих две проводящие пластины, ограничивающие диэлектрическую подложку. Технология интеграции волновода в подложку называется SIW-технологией (Substrate Integrated Waveguide) [1]. Эта технология получила широкое распространение благодаря возможности уменьшения массогабаритных параметров изделия, а также относительно низкой стоимости и простоте изготовления, при сохранении высокого коэффициента добротности и низких вносимых потерь, присущих классическим прямоугольным волноводам [1-3]. Распространение электромагнитных волн внутри SIW-структур идентично распространению в прямоугольных волноводах, а основная мода аналогична моде  $TE_{10}$  прямоугольного волновода [4].

Данная работа посвящена электродинамическому анализу и синтезу узкополосного фильтра, выполненного с использованием SIW-технологии на основе смешанной перекрестной связи для получения квазиэллиптического отклика. Рассматриваемый SIW-фильтр образован тремя резонаторами, имеющими как последовательные, так и перекрестные связи между собой. Перекрестная связь часто используется в SIW-фильтрах для получения нулей пропускания и повышения селективности. В отличие от SIW-фильтра только с последовательной связью, SIW-фильтр с перекрестной связью способен достигать лучшей селективности. Однако в то же время структура перекрестной связи влияет на компоновку схемы, ухудшает гибкость конструкции SIW-фильтра и снижает изоляцию между портами. Для решения этих проблем целесообразно добавлять структуру перекрестной связи в SIW-фильтр с последовательными связями. Компьютерное моделирование проводилось в системе автоматизированного проектирования CST Microwave Studio.

На рис.1 (а,б) показаны чертеж синтезированного фильтра и его 3-D модель с размерами  $36 \times 15.5$  мм. Амплитудно-частотные характеристики приведены на рис.2.

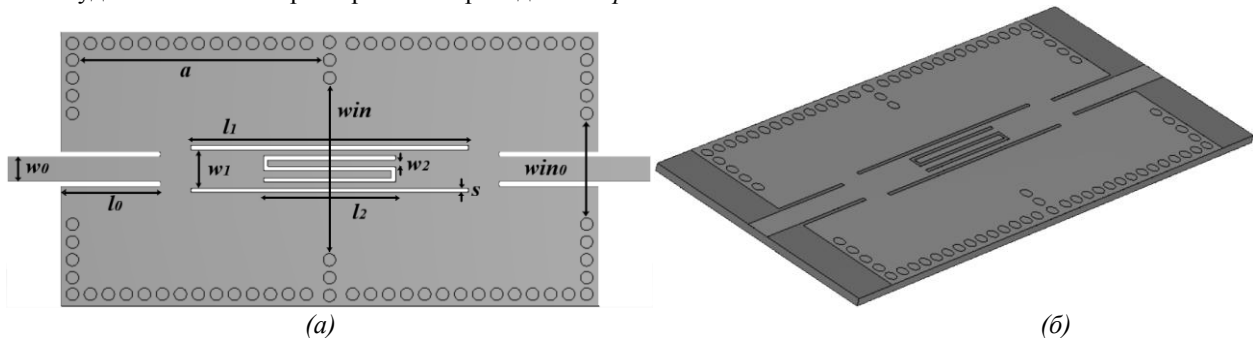


рис.1. Чертеж синтезированного фильтра (а) и его 3-D модель (б).

Размеры, показанные на рис.1, составляют  $a = 13,7$  мм,  $l_0 = 5,56$  мм,  $l_1 = 15,52$  мм,  $l_2 = 7,37$  мм,  $w_0 = 1,45$  мм,  $w_1 = 2,17$  мм,  $w_2 = 0,39$  мм,  $win = 9,11$  мм,  $win_0 = 3,80$  мм,  $s = 0,22$  мм. Толщина диэлектрика составляет  $0,508$  мм, а толщина металлизации –  $0,035$  мм.

По результатам работы получена амплитудно-частотную характеристику, показанная на рис.2. На графике хорошо видны нули передачи с обеих сторон полосы пропускания, образованные благодаря квазиэллиптическому отклику фильтра. Таким образом, получается наиболее прямоугольная характеристика пропускания, что способствует улучшению селективности фильтра.



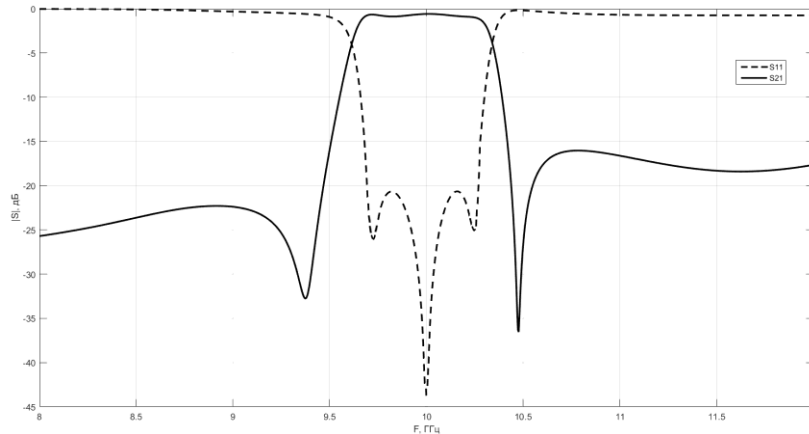


рис.2. Зависимость коэффициента передачи ( $|S_{21}|$ ) и отражения ( $|S_{11}|$ ) от частоты синтезированного фильтра.

В ходе работы продемонстрирован процесс синтеза узкополосного квазиэллиптического SIW-фильтра третьего порядка с центральной частотой 10 ГГц. Полученный фильтр может быть использован в качестве основного фильтрующего элемента для разработки высокоэффективных фильтров в микроволновых и беспроводных схемах и системах для повышения их частотной селективности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, номер гранта № 22-79-00127 «Разработка гибких частотно-селективных устройств с применением SIW-технологии для спутников и беспилотных летательных аппаратов».

Список публикаций:

- [1] Gadzieva, A.A., Zargano, G.F., Zemlyakov, V.V., Krutiev, S.V., *SIW-technologies, history of creation, current state and prospects of development, Physical bases of instrumentation*, 2012. - Т. 1. - № 4. - с. 3-11.
- [2] S. V. Krutiev, V. P. Sdobnova, S. P. Bukin, A. N. Grizodub "Compact Filters on Dielectric Paper Substrate", 2023 *IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347630.
- [3] X. Chen, W. Hong, J. Chen and K. Wu, "Substrate Integrated Waveguide (SIW) Linear Phase Filter," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol.15, pp. 787-789, Nov. 2005.
- [4] F. Xu and K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 53, no. 1, pp. 66-73, Jan. 2005.
- [5] A. Belenguer, H. Esteban, and V. Boria, "Novel empty substrate integrated waveguide for high-performance microwave integrated circuits," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 4.
- [6] Viacheslav Zemlyakov, Sergey Krutiev, Mikhail Tyaglov, Valery Shevchenko A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2019, 47(1), pp. 55-64, DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.2566>.

## Исследование потенциальных дефектов КМОП ИМС с помощью измерительно-вычислительного комплекса на базе спектрометра DLS-82E

**Виноградова Елизавета Владимировна**

*Размахов Никита Сергеевич, Рахимов Владислав Шамсудинович*

*Юдин Максим Андреевич*

**Владимирский государственный университет**

*Крылов Владимир Павлович, д.т.н.*

[tikhonravova.elizaveta@mail.ru](mailto:tikhonravova.elizaveta@mail.ru)

Электроника ответственного применения должна обладать высокой надёжностью и длительным сроком службы, поэтому крайне важно не допустить попадание в неё потенциально негодных электронных компонентов. Существующие методы входного контроля и отбраковки полупроводниковой электронной компонентной базы (ЭКБ) не обеспечивают в полной мере требуемую надёжность и срок службы, поэтому на сегодняшний день все чаще прибегают к использованию диагностических методов контроля качества полупроводниковых электронных компонентов. Поскольку на этапах производства полупроводниковых электронных элементов постепенно начинается процесс неконтролируемого введения примесей, существенно влияющих на выход годных устройств, необходимо использовать квалигенетические методы дополнительного контроля для выявления потенциальных дефектов [2].

Для анализа электрически активных дефектов в полупроводниках широко применяется метод емкостной релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ), характеризующийся высокой чувствительностью к низким концентрациям дефектов, а также позволяющий различать сигналы от глубоких центров с различными значениями энергий активации и исследовать дефекты не только в объеме полупроводника, но и в подзатворном диэлектрике, а также на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>. Значение понятия «релаксация» характеризует относительно медленную фазу процесса восстановления начального состояния барьерной структуры, вызванную наличием глубоких объемных и поверхностных дефектов различной природы. В полупроводнике эти дефекты приводят к образованию одного или нескольких энергетически глубоких уровней (ГУ) в запрещенной зоне, находящихся дальше от границы запрещенной зоны, чем мелкие уровни основных примесей, определяющих тип проводимости. На сегодняшний день характер влияния ГУ до конца не изучен, но известно, что чем ближе глубокий уровень к середине запрещенной зоны, тем весомее его влияние на время восстановления рп-перехода [2].

Изучение параметров глубоких центров с помощью метода емкостной РСГУ может стать перспективным методом дополнительного контроля, который поможет сократить количество потенциально ненадежных компонентов в партии до этапа электротермотренировки, снизив затраты на отбраковочные испытания. С помощью РСГУ возможно идентифицировать дефект, определив такие параметры глубоких центров, как сечение захвата, энергия активации и распределение концентрации в объеме полупроводника [1].

В результате НИР № 5347/22 «Обоснование новых методов контроля потенциальных дефектов КМОП ИМС и компенсации процессов радиационной деградации детекторов ТЗЧ», выполненной в рамках научной программы Национального центра физики и математики, были проведены исследования электронных компонентов методами РСГУ. С использованием экспериментальной установки, включающей измерительно-вычислительный комплекс, основанный на климатической испытательной камере S-1.2B-3200 от Thermotron Industries, обеспечивающей автоматическое поддержание заданной температуры от -70 до +170°C в рабочем объеме 30 литров, и модернизированного спектрометра DLS-82E от SemiLab, были получены частотные зависимости преобразованного сигнала релаксации емкости при постоянной температуре (рис. 1). Внутри рабочего объема климатической камеры с помощью встроенной автоматики обеспечивается точность поддержания температуры на уровне ±1 К. В помещении лаборатории поддерживается комнатная температура. Для осуществления подключения к спектрометру глубоких уровней выводы микросхем соединялись в виде двухполюсников [4].

При идентификации параметров моделей частотных сканов были выявлены значения амплитуды пика сигнала релаксации, постоянной времени и коэффициента нелинейности, отличного от экспоненциального, затем были построены графики в координатах Аррениуса и согласно стандарту ASTM F978-02 определены значения энергии активации дефектов различных образцов.

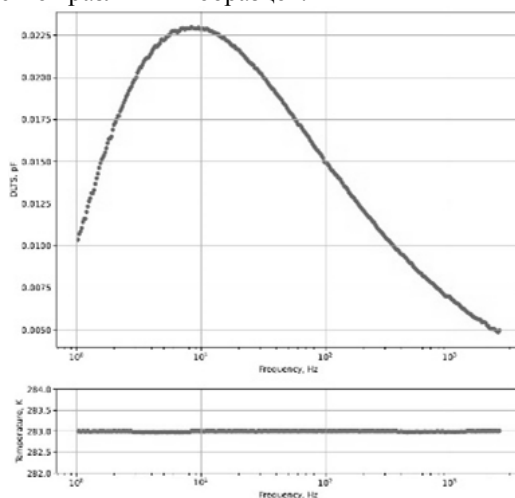


рис.1. Пример частотного скана ИС IN74VHC02D

Поскольку полученные значения энергии активации различных образцов отличаются, а их трехсигнальные интервалы не пересекаются, возможно предположить, что электронные компоненты содержат различные потенциальные дефекты, которые могут быть определены при помощи емкостной РСГУ.

Частотное сканирование при постоянной температуре образца способно обеспечить повышение точности определения параметров ГУ, в частности  $\Delta E$ , в 4–5 раз по сравнению со стандартом F978-02 [1]. Введение в модель частотного скана параметра  $\rho$  повышает точность определения постоянной релаксации  $\tau$ , что совместно с увеличением числа экспериментальных частотных сканов способно значительно повысить точность определения  $\Delta E$  – энергии активации глубоких уровней (ГУ) [3].

Список публикаций:

[1] ASTM F 978–02 Standard Test Method for Characterizing Semiconductor Deep Levels by Transient Capacitance Techniques // Current edition approved Jan 10, 2002. Originally published as F 978–86. Last previous edition F 978–90 // Annual Book of ASTM Standards. Vol. 10.05.

[2] Крылов В.П. Квалигенетика полупроводниковой ЭКБ: фантастика или необходимость? Некоторые аспекты обеспечения качества полупроводниковой ЭКБ // Электронные компоненты. 2015. № 10. С. 22–25.

[3] Крылов В. П., Богачев А. М., Пронин Т. Ю. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и неразрушающий контроль потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 2.

[4] Крылов В.П., Богачев А.М. Релаксация глубоких центров в транзисторах и интегральных микросхемах // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 6. С. 568–572. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-6-568-572.

## **Разработка время-цифрового преобразователя на основе ПЛИС**

**Горбачев Никита Васильевич**

**Клеценков Анатолий Борисович**

**Южный федеральный университет**

**Клеценков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.**

**[ngorbachev@sfedu.ru](mailto:ngorbachev@sfedu.ru)**

Актуальность измерений малых интервалов времени заключается в их важности для различных областей науки и технологии. Точное измерение времени событий, протекающих в масштабах пикосекунд, имеет фундаментальное значение для понимания физических процессов на уровне элементарных частиц, квантовых систем и взаимодействия материи. В области телекоммуникаций, точные измерения временных задержек сигналов помогают обеспечивать стабильную и эффективную передачу данных в высокоскоростных сетях. В медицинской диагностике измерение времени реакции и задержек используется для диагностики различных состояний и расстройств. Кроме того, аккуратные измерения малых интервалов времени в астрономии позволяют исследовать космические явления и процессы, такие как взрывы сверхновых и гравитационные волны. В коммерческих проектах измерения малых интервалов времени требуются в лазерных дальномерах (LIDAR), расходомерах (счетчиках воды, газа), измерителях теплового потока. Видно, что разработка измерительного устройства малых интервалов времени представляется актуальной задачей, так как оно позволит разрешить ряд научных и научно-производственных вопросов.

Время-цифровой преобразователь (ВЦП) — это устройство, используемое для измерения временного интервала и преобразования его в цифровой (двоичный) выходной сигнал. ВЦП может быть реализован в специализированных интегральных схемах (СИХ), программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) или микроконтроллерах (МК). ВЦП на базе СИХ показывают большую стабильность характеристик при изменении напряжения, температуры, они более устойчивы к изменениям окружающей среды. Однако СИХ дороги для небольших серий производства, требуют специализированной аппаратной обвязки, что увеличивает временные рамки разработки и снижает гибкость использования ВЦП в различных конфигурациях приборов [1]. МК привлекают простотой разработки и дешевизной, однако, даже используя встроенные в МК таймеры и системы прерываний, мы ограничены скоростью обработки на физическом уровне, и не можем обойти аппаратные ограничения процессорных решений. В свою очередь ПЛИС имеет преимущества по следующим критериям: короткий цикл разработки, реализация аппаратных блоков для выполнения специальных задач, возможность разработки архитектуры проекта без привязки к конкретной модели.

Принцип измерения параметров принятого сигнала заключается в следующем: входной сигнал поступает на вход регистра ПЛИС, оцифровывается компаратором на частоте тактового сигнала и поступает на обработку в виде двоичной последовательности. В данной последовательности содержится информация о параметрах принятого импульса. Выделение параметров – это задача алгоритма на основе программируемой логики. На данном этапе увеличение разрешающей способности возможно лишь за счет увеличения частоты срабатывания компаратора. При непосредственном использовании входов ПЛИС разрешающая способность полученного ВЦП остается невелика и ее предельное значение физически ограничено частотой срабатывания компараторов. Использование нескольких портов ввода позволяет увеличить разрядность формируемой последовательности, тем самым увеличивая разрешающую способность устройства. Порты ввода ПЛИС при этом соединяются через замедляющую систему (ЗС) [2]. Принцип действия ЗС приведен на рис.1. Видно, что импульс “растягивается” во времени в ЗС и становится возможным за фронт сигнала задействовать большее число портов ПЛИС, тем самым повысив разрядность формируемой двоичной последовательности и увеличить разрешающую способность ВЦП. Таким образом, повышение разрешающей способности ВЦП достигается следующими способами: увеличением количества отводов в ПЛИС от ЗС, увеличением коэффициента замедления ЗС, увеличением частоты защелкивания регистров.

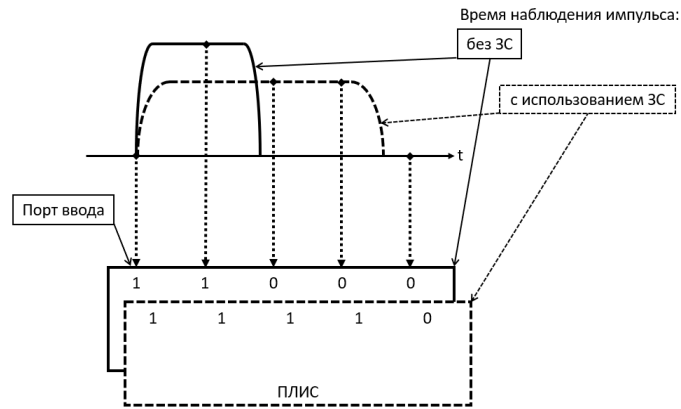


рис. 1. Принцип увеличения разрешающей способности ВЦП при использовании ЗС

В разработанном устройстве разрешающая способность составляет 411 пикосекунд (Рис.2). Текущая точность позволяет использовать полученное устройство в ультразвуковых датчиках расстояния, в устройствах расходомеров. Лазерный дальномер с таким ВЦП будет иметь погрешность определения расстояния 12 см. Планируется увеличение разрешающей способности до 55 пикосекунд, посредством увеличения разрядности зашелкивающего регистра ПЛИС и увеличения коэффициента замедления ЗС.

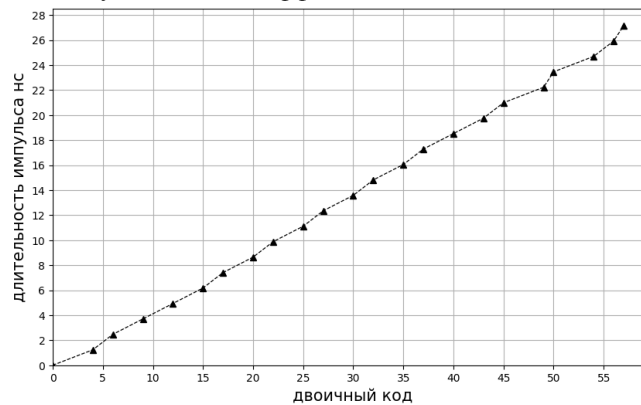


рис. 2. Длительность измеряемого импульса и полученный соответствующий ей код

Список публикаций:

- [1] Y. Kim, T.W. Kim, An 11 b 7 ps resolution two-step time-to-digital converter with 3-d vernier space, *IEEE Trans. Circuit. Syst. I: Regular Papers* 61 (2014) 2326–2336.  
 [2] Min Zhu, Xihan Qi, Tang Cui, Qiang Gao. Tapped delay line for compact time-to-digital converter on UltraScale FPGA and its coding method.

## Квазиэллиптический полосно-пропускающий SIW-фильтр

**Гризодуб Алексей Николаевич**  
 Южный федеральный университет  
 Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
[agrizodub@sfedu.ru](mailto:agrizodub@sfedu.ru)

Встроенные в подложку волноводы (SIW) в последнее время привлекают большое внимание. Благодаря интеграции классических волноводных компонентов в плоской форме, технология SIW обеспечивает: простоту изготовления, компактные размеры, малый вес, а также хорошие электромагнитные характеристики. [1-3]

В статье представлен квазиэллиптический полосовой фильтр четвёртого порядка со встроенными микрополосковыми портами. Данная конструкция реализована с помощью двухрежимного SIW-резонатора микрополосковых резонаторах на входах и кольцевого разомкнутого резонатора. Топология фильтра представлена на (рис.1) [4]

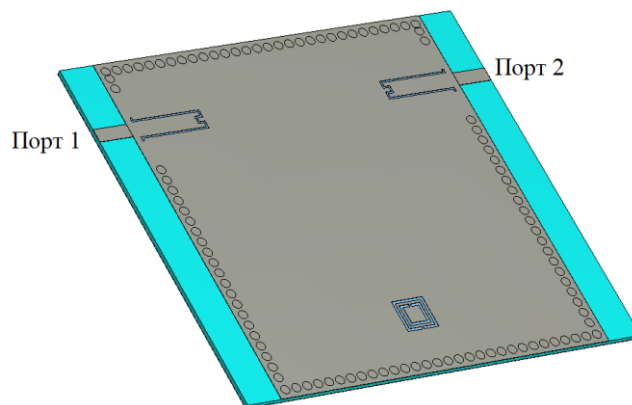


рис.1 Топология фильтра

Такая конструкция позволяет обеспечить высокую селективность фильтра за счёт организации нулей передачи в частотной характеристике фильтра. Амплитудно-частотная характеристика фильтра представлена на (рис.2)

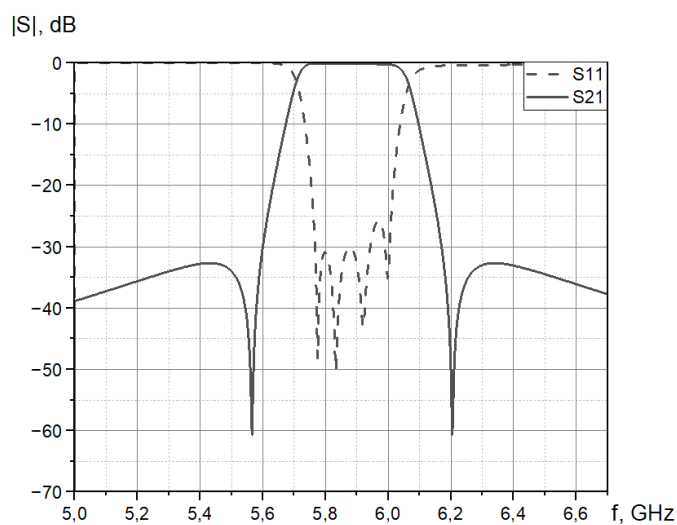


рис.2 Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Устройство смоделировано на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2.2$  толщина подложки  $h = 0.508$  мм, толщина металлизации 35мкм.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, номер гранта № 22-79-00127 «Разработка гибких частотно-селективных устройств с применением SIW-технологии для спутников и беспилотных летательных аппаратов».

Список публикаций:

- [1] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, A., Sdobnova, V. Synthesis of Band-Pass Filters Made Using SIW Technology // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 118–122
- [2] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, P., Sdobnova, V. Narrow-Band Waveguide Filter on Complex Resonant Diaphragms // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 108–111
- [3] Krutiev S., Sdobnova V., Bukin S., Grizodub A. Compact Filters on Dielectric Paper Substrate // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2023, pp 96-99
- [4] Гаджиева, А.А., Заргано, Г.Ф., Земляков, В.В., Крутыев, С.В., SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития // Физические основы приборостроения, 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 4–13.

## Исследование магнитоэлектрического датчика деформаций

Друженков Артём Владимирович

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.

[druzhnikovav@gmail.com](mailto:druzhnikovav@gmail.com)

В последние годы широкое применение в науке и технике находит магнитоэлектрический (МЭ) эффект [1]. Наблюдает прямой и обратный МЭ эффекты. Суть прямого МЭ эффекта состоит в изменении электрических свойств материала под воздействием внешнего магнитного поля, а при обратном МЭ эффекте происходит изменение магнитных свойств материала при воздействии внешнего электрического поля. Уже известно достаточно много практических применений МЭ эффекта, но особенно широкое применение этот эффект нашел при создании различных датчиков физических величин. В данной работе мы представляем результаты предварительного исследования МЭ датчика деформаций. В отличие от датчиков давления, которые используются для измерения механических вибраций в широком частотном диапазоне, датчики деформаций предназначены для измерения одиночных механических воздействий. Такие измерения часто требуются при геологических работах. Объектом исследования была выбрана симметричная МЭ структура, состоящая из поляризованной пьезоэлектрической пластинки ЦТС керамики и тонких слоев магнитоэлектрического аморфного сплава Метглас с поперечным размером 10x30мм, толщина пластинки ЦТС 0,5 мм, толщина одного слоя Метгласа 20 мкм. Соединение пластинки ЦТС с тремя слоями Метгласа с каждой стороны выполнялось проводящим клеем. Было проведено два типа экспериментов. В первом случае на калиброванном пневматическом стенде с помощью тензометрического датчика CLA снималась зависимость электрического напряжения, возникающего на отдельной поляризованной пластинке ЦТС, от приложенной механической нагрузки (Рис.1 – синяя линия). Вертикальная ось – электрическое напряжение в В, горизонтальная ось – механическая нагрузка в кг. Во втором эксперименте вместо пластинки ЦТС измерялась симметричная слоистая МЭ структура (Рис.1 – красная линия).

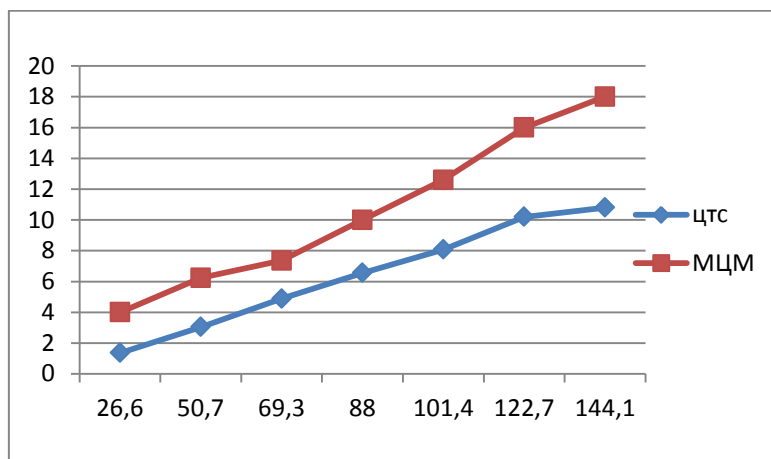


рис. 1. Зависимости электрического напряжения от приложенной механической нагрузки для двух типов экспериментов.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что дополнительное электрическое напряжение возникает в результате обратного МЭ эффекта, учет которого позволит определить изменение МЭ коэффициента при воздействии механической нагрузки с учетом магнитоэлектрической зависимости. Проведенная калибровка необходима для получения точных связей между измеряемым МЭ коэффициентом и внешней механической нагрузкой, что даст возможность спроектировать МЭ датчик деформаций.

Список публикаций:

[1] Bichurin M., Petrov V. // *Modeling of magnetoelectric effects in composites, Springer series in material science, Volume 201, 2014, 108p.*

[2] Bichurin, M.I.; Viehland, D. (Eds.) *Magnetoelectricity in Composites; Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.: Singapore, 2012; 273p*

## Методы пространственно-временного управления световым лучом с помощью активных метаповерхностей

**Коноплев Артем Александрович**  
Южный федеральный университет  
Клеценков Анатолий Борисович  
[akonoplev@sfedu.ru](mailto:akonoplev@sfedu.ru)

Последние несколько лет во многих сферах человеческой деятельности появляется необходимость в инструментах оптического сканирования. Распространение машин с автопилотом, робототехника, системы дополненной/виртуальной реальности, средства отображения визуальной информации давно имеют запрос на недорогие, малогабаритные лидары. Лидар – аналог радара для волн оптического диапазона, устройства, сканирующие область лазерным лучом. Лидар превосходит устройства радиодиапазона разрешением изображения сканируемой местности благодаря меньшей длине волны, что принципиально важно для многих задач. Однако, до сих пор лидары не используются повсеместно из-за некоторых своих недостатков. Часть из них: стоимость, размеры, быстродействие возможно побороть использованием метаповерхностей.

Изначально, в лидарах использовались механические способы управления сканирующим лучом – зеркало вращается при помощи двигателя, благодаря чему при статичном облучателе луч сканирует необходимое пространство. Использование метаповерхности позволит повысить скорость сканирования, по сравнению с механическим управлением направлением луча. Другим преимуществом отражателя на метаповерхности перед механическим отражателем является небольшой размер устройства, что важно для автомобильной промышленности. Эти факторы побуждают считать нас электронное сканирование более перспективным.<sup>[1][3]</sup>

Работа посвящена рассмотрению принципов, которые лежат в основе функционирования метаповерхностей. Далее перечислены некоторые из них.

Компромиссным решением между механическим управлением и использованием метаповерхности является использование MEMS(micro-electromechanical systems)-отражателей. Суть технологии заключается в том, что каждый элемент метаповерхности представляет из себя небольшое зеркало с механическим приводом. Таким образом при синхронном повороте всех зеркал под одинаковым углом мы получаем отраженный луч идентичный лучу, который получился бы при отражении от большого зеркала, повернутым под тем же углом.<sup>[1][2]</sup>

В работе Dual-Gated Active Metasurface at 1550 nm with Wide (>300°) Phase Tunability<sup>[4]</sup> предлагается управление излучения путем модуляции свободных носителей заряда, возбуждению фотоносителей, что позволяет изменять диэлектрическую проницаемости областей отражателя. Модуляция происходит благодаря подачи напряжения на необходимые элементы метаповерхности<sup>[1]</sup>

В основе похожего метода лежит изменение диэлектрической проницаемости с помощью фазового перехода вещества. Например, при изменении температуры VO<sub>2</sub>, он сильно меняет свою диэлектрическую проницаемость.<sup>[1]</sup>

Ещё одной технологией управления лучом является метод в котором за счет прямого управления фазовым распределением создается фронт оптической волны, что позволяет формировать максимум излучения в заданном направлении. Рассмотрена технология lidar-on-a-chip, которая предполагает создание устройства целиком на цельном кристалле кремния.<sup>[2]</sup>

Сопоставлены различные способы управления лучом, их достоинства и недостатки. Сравнены прототипы, задействующие вышеперечисленные методы.

Список публикаций:

[1] Shaltout, A. M., Shalaev, V. M., & Brongersma, M. L. *Spatiotemporal light control with active metasurfaces*. *Science*, 364(6441), eaat3100. doi:10.1126/science.aat3100 (2019)

[2] <https://spectrum.ieee.org/kyber-photonics-solid-state-lidar-on-a-chip-system>.

[3] M.R. Watts *Lidar on a Chip Enters the Fast Lane: Sensors for Self-Driving Cars and Robots will be Tiny, Reliable, and Affordable*. September 2023 *IEEE Spectrum* 60(9):38-43

[4] Ghazaleh Kafaie Shirmanesh, Ruzan Sokhoyan, Ragip A. Pala, and Harry A. Atwater *Dual-Gated Active Metasurface at 1550 nm with Wide (>300°) Phase Tunability Nano Lett.* 2018, 18, 5, 2957–2963

Publication Date: March 23, 2018

## **Разработка устройства для аудита беспроводных сетей Wi-Fi, работающего совместно с Android-смартфоном**

**Кривцов Владимир Георгиевич**  
Южный федеральный университет  
Крутыев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
[vlkrivcov@sfedu.ru](mailto:vlkrivcov@sfedu.ru)

Работа описывает разработку компактного устройства, встраиваемого в чехол смартфона и подключаемого к нему по интерфейсу USB, позволяющего проводить аудит беспроводных сетей Wi-Fi. Устройство позволяет провести аудит, не прибегая к использованию ПК или ноутбука, а позволяет обойтись одним смартфоном с соответствующим чехлом и программным обеспечением. Конструкция устройства представлена на *рис. 1*.



*рис.1. – Печатная плата устройства и способ его монтирования в чехол смартфона*

Аудит позволяет обнаружить отклонения и уязвимости в сетях Wi-Fi, определить их класс, уровень угрозы и возможные методы их устранения. На данный момент повсеместная распространенность доступных точек доступа Wi-Fi создаёт множество уязвимостей в беспроводных сетях. Причиной этого в основном является некорректное конфигурирование точек доступа, наличие уязвимостей в их ПО и отсутствие обновлений ПО от производителя. В работе проанализированы различные варианты схемотехнического и конструктивного исполнения устройства, его антенн и интерфейса взаимодействия со смартфоном. Разработана печатная плата и ПО для смартфона. Получены первые результаты работы.

Список публикаций:

- [1] Md. Waliullah, Diane Gan, “Wireless LAN Security Threats & Vulnerabilities: A Literature Review”, (IJACSA)International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 5, No. 1, 2014.
- [2] P. Feng, “Wireless LAN Security Issues and Solutions”, IEEE Symposium on Robotics and Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 921-924, 3-5 June, 2012.
- [3] I Palamà, A Amici, G Bellicini, F Gringoli, F Pedretti, G Bianchi, “Attacks and vulnerabilities of Wi-Fi Enterprise networks: User security awareness assessment through credential stealing attack experiments”, Computer Communications 212, 129-140

## **Разработка автоматизированной оснастки для испытаний источников питания**

**Кутилов Иван Иннокентьевич**  
Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого  
Петров Владимир Михайлович  
[sos11132@yandex.ru](mailto:sos11132@yandex.ru)

Источник питания — это электрическое устройство, которое подает электроэнергию на электрическую нагрузку. При производстве любых источников питания одним из самых важных этапов является проведение приёмо-сдаточных испытаний. На ручных стендах испытаниями занимаются 1-2 человека. Один изменяет входные сигналы устройства, а второй записывает измеренные выходные параметры. В результате такой работы увеличивается время проверки источников питания, а также, при проведении измерений, могут



допускаться ошибки, вызванные человеческим фактором. Для решения этих проблем при проведении приёмодаточных испытаний необходимо разработать автоматизированную оснастку для испытаний источников питания.

В связи с вышеописанным, тема представленной работы актуальна, т.к. решает следующие задачи: автоматизированная оснастка значительно сокращает время проверки электронных блоков; автоматизированный процесс проверки источников питания исключает ошибки из-за «человеческого фактора» и повышает качество контроля; при испытании большого количества источников питания накапливается большое количество автоматически созданных отчетов, что позволяет анализировать статистику неисправностей для последующего улучшения технологии производства или эксплуатации источников питания.

Целью данной работы является разработка автоматизированной оснастки для испытаний источников питания и оценка её надежности. В качестве примера рассмотрена оснастка для вторичного источника питания.

В литературной части работы был проведен анализ видов вторичных источников питания, описан их принцип работы.

В работе был рассмотрен вторичный источник питания, для которого требовалось разработать оснастку. На основе этого анализа были сформированы требования к разрабатываемой оснастке, были выбраны необходимые пакеты прикладных программ.

В конструкторской части работы была разработана топология печатной платы, используемой в оснастке, разработано программное обеспечение. Далее был проработан и смоделирован оптимальный конструктив, отвечающий требованиям задачи исследования.

Далее был проведен анализ надежности разработанной оснастки.

Результаты проделанной работы предполагается использовать при разработке комплекта конструкторской документации, по которому можно изготовить оснастку, а также для расчета электрической схемы устройства.

Список публикаций:

- [1] Гончаров А. Практика применения конверторных модулей класса DC/DC // Электронные компоненты. 1999 № 1–3.
- [2] Нагайцев А., Твердов И. Новые модули питания с широким (4:1) диапазоном входных напряжений // Электрическое питание. Выпуск 7 Научно-технический сборник докладов 1-й Всероссийской конференции по средствам электропитания.
- [3] Википедия. Импульсный трансформатор. [Электронный ресурс] URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Импульсный\\_трансформатор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Импульсный_трансформатор)

## Разработка прототипа шагающего марсохода на базе AVR

*Миназов Ильнур Ильшатович*

*Уфимский университет науки и технологий*

*[ilnuruunit@gmail.com](mailto:ilnuruunit@gmail.com)*

Основной целью данной работы была разработка прототипа шагающего марсохода на базе AVR. Учёные при непосредственном изучении поверхности Марса в подавляющем большинстве случаев используют колёсные устройства на основе подвески rocker-bogie (рис. 1.).

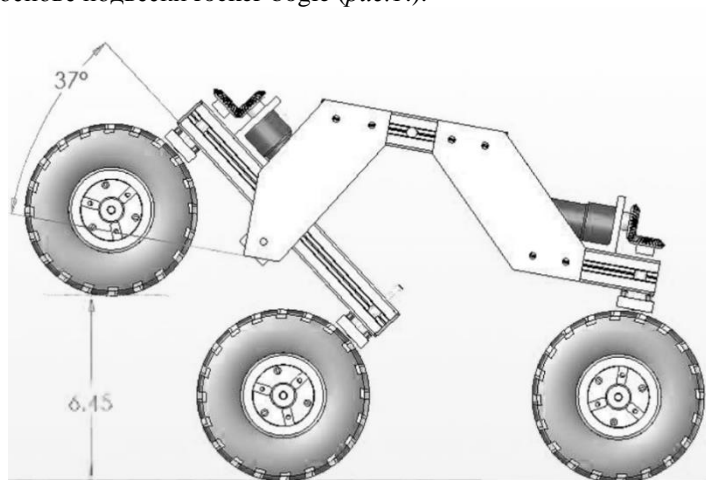


рис.1. Подвеска rocker-bogie.

Однако, несмотря даже на все преимущества такой подвески, трудности в эксплуатации аппарата всё равно возникают. В том числе из-за недостатков колёсного механизма, одним из которых является отсутствие возможности поворота средних колёс, что исключая движение вбок, сильно снижает мобильность аппарата. Также аппарат рискует оказаться в критической ситуации, как это было с ровером Opportunity сразу после посадки на дно кратера Игл. Проблема заключалась в том, что марсоход не мог выехать по направлению на угол наибольшего подъёма (до 17°). В результате чего выехать удалось только “косогором”.

Эту проблему решает подвеска шагохода. Благодаря тому, что контакт с поверхностью происходит не за счёт колёс, а за счёт острых клиньев, аппарат не подвергается буксировке.

Корпус для робота был спроектирован в программе FreeCAD. После чего был распечатан на 3D-принтере. В качестве электронной начинки для прототипа выступили модули Arduino. Программное обеспечение было написано на объектно-ориентированном языке программирования C++.

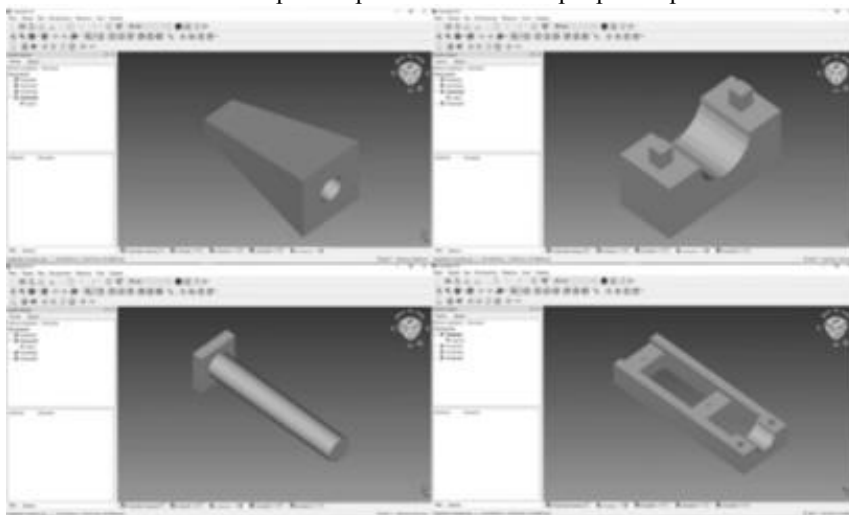


рис.2. Модели лап в программе FreeCAD.

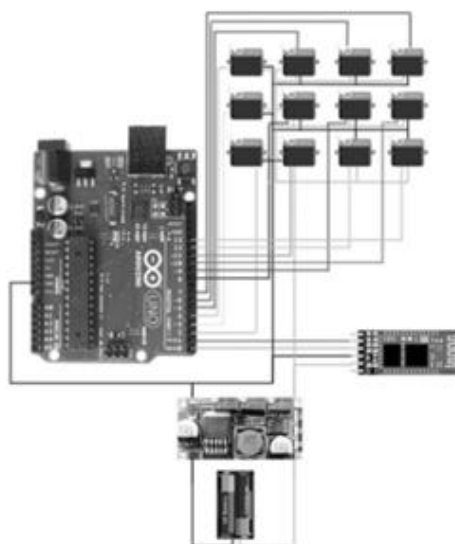


рис.3. Схема устройства.

Ключевым и важнейшим элементом прототипа является плата Arduino UNO. К ней через цифровые порты подключается 12 сервоприводов. По три на каждую “лапу”. Первые два обеспечивают двухосевое движение “плеч” а третий играет роль сгибаемого коленного сустава, позволяя совершать шаги. Также на “предплечья” были установлены амортизирующие пружины. Питание идёт от батареек, однако между ними и платой необходимым элементом является понижающий DC-DC преобразователь. Управление роботом осуществляется через Bluetooth связь. Для её обеспечения нужен Bluetooth-модуль. Он подключается на сигнальные RX-TX пины.

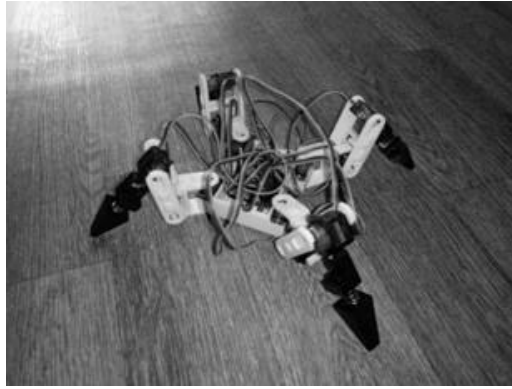


рис.3. Готовый прототип.

Данный прототип в силу своей конструкции способен справляться с различными препятствиями, с которыми не справился бы привычный ровер на rocker-bogie подвеске. В том числе имеет способность взбираться на относительно крутые склоны (более  $17^\circ$ ). Управление прототипом осуществляется за счёт Bluetooth связи.

Список публикаций:

- [1] Дэвид М., Харрис и Сара М. Харрис, *Цифровая схемотехника и архитектура компьютера* – Волтем: Morgan Kaufmann, 2013. – 1621 с.
- [2] Бондаренко Д.Н., *Встраиваемые микроконтроллеры AVR-8*. Санкт-Петербург, 2014. – 193 с.
- [3] Кёниг Эндрю, Му Барбара, *Эффективное программирование на C++*. Серия C++ In-Depth, т. 2.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2002. – 384 с.
- [4] [DIY] Spider Robot / URL: <https://www.instructables.com/DIY-Spider-RobotQuad-robot-Quadruped>

**Методы компенсации погрешности «walk error» времяпролётного лидара с время-цифровыми преобразователями**  
**Мошеченко Сергей Дмитриевич**  
 Южный федеральный университет  
 Клещевков Анатолий Борисович, к.ф.-м.н.  
[su\\_fullback@mail.ru](mailto:su_fullback@mail.ru)

Времяпролётный лидар – лазерный дальномер, определяющий расстояние до отражающей поверхности по временному промежутку между моментом излучения импульса лазерным диодом и моментом попадания отражённого импульса на фотоприемник.

Точность определения расстояния времяпролётным лидаром зависит от множества погрешностей, носящих как случайный, так и систематический характер. Погрешности, носящие случайный характер, связаны с несовершенством аппаратных средств: ограниченной полосой усилителя фотодиода (УФ), недостатком точности время-цифровых преобразователей (ВЦП) и т.д. Погрешности, носящие систематический характер, изменяются в зависимости от определённого внешнего фактора: температура; задержки распространения сигнала; изменение формы отражённого импульса – т.н., «walk error» или пролетная ошибка [1].

Изменение интенсивности отражённого импульса приводит к изменению формы импульса на выходе УФ. Момент превышения напряжения сигнала с УФ над пороговым уровнем компаратора, формирующего цифровой сигнал управления ВЦП, смещается во временной области, что приводит к неоднозначности фиксации моментов фронта импульса отраженного сигнала (рис.1).

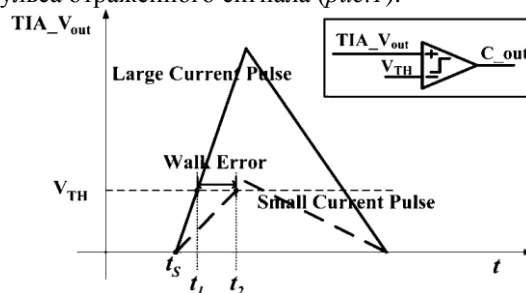


рис.1. Ошибка определения времени прихода отраженного импульса на выходе УФ при различной интенсивности отраженного сигнала с пороговым уровнем компаратора.

Погрешность измерений, возникающая по этой причине, называется «walk error». Величина «walk error» может составлять десятки наносекунд, что существенно искажает измеренные значения времени полёта, и, как следствие, значения расстояния до отражающей поверхности. Таким образом, метод измерения расстояния до отражающей поверхности с помощью определения времени полёта довольно чувствителен к изменению формы отражённого импульса.

Методы компенсации погрешности «walk error» времяпролётных лидаров с ВЦП делятся на две группы: аппаратные и программные. Аппаратные методы компенсации погрешности walk error подразумевают изменение формы импульса с использованием аппаратных средств, позволяющих уменьшить искажение формы импульса УФ. Применение многокаскадного компаратора [2] позволяет уменьшить погрешность «walk error» до 196 пс в полосе 256 МГц. Другой подход, основанный на применении пик-детектора [3], повышает точность определения момента прихода отражённого импульса и уменьшает значение «walk error» до 30 пс в динамическом диапазоне 1:5000.

Программные методы компенсации погрешности «walk error» заключаются в обработке искажённого времени полёта с использованием дополнительных сведений о форме импульса. В частности, при изменении амплитуды импульса на выходе УФ меняется его длительность, что может быть использовано для поиска компенсационной кривой – функции корректировки искажённого времени полёта, зависящей от длины импульса. Главным недостатком такого метода является необходимость предварительной калибровки: проведения серии измерений времени полёта и длины импульса для набора расстояний из рабочего диапазона дистанций до отражающей поверхности. Компенсационная кривая, полученная в [4], позволяет уменьшить «walk error» до 175 пс в динамическом диапазоне ~1:100000, а встроенные решения с применением компенсационной кривой [5] позволяют уменьшить «walk error» до 20 пс в динамическом диапазоне >1:40000.

Список публикаций:

[1] Hong-Soo Cho, Chung-Hwan Kim, Sang-Gug Lee // *A High-Sensitivity and Low-Walk Error LADAR Receiver for Military Application. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, том 61, №10, 2014.

[2] Jinhai Xiao, Maliang Liu, Zhangming Zhu // *Low walk error multi-stage cascade comparator for TOF LiDAR application. Microelectronics Journal*, том 116, 2021.

[3] Xiayu Wang, Rui Ma, Dong Li, Hao Zheng, Maliang Liu, Zhangming Zhu // *A Low Walk Error Analog Front-End Circuit With Intensity Compensation for Direct ToF LiDAR. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, том 67, №12, 2020.

[4] S. Kurtti, J. Nissinen, J. Kostamovaara // *A Wide Dynamic Range CMOS Laser Radar Receiver With a Time-Domain Walk Error Compensation Scheme. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, том 64, №3, 2017.

[5] Sami Kurtti, Jussi-Pekka Jansson, Juha Kostamovaara // *A CMOS Receiver-TDC Chip Set for Accurate Pulsed TOF Laser Ranging. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, том 69, №5, 2020.

## **Разработка десятиканального источника тока для гальванического осаждения**

**Огурцов Евгений Сергеевич**

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Петров Владимир Михайлович*

*[oes7076@yandex.ru](mailto:oes7076@yandex.ru)*

Одним из наиболее широко применяемых методов защиты металлических деталей в машино- и приборостроении являются гальванические и другие покрытия, осуществляемые благодаря применению электрохимических процессов. Ключевым компонентом, обеспечивающим работу такого процесса, является источник тока и от правильного выбора такого источника зависит должное качество обработки, безаварийность работы всей линии, а в некоторых случаях и возможность нанесения покрытия. Так же немаловажным фактором является возможность параллельного осаждения металлов сразу на несколько изделий при различных значениях силы тока от одного источника тока. Для решения этих проблем при проведении гальванического осаждения предлагается использовать многоканальный источник тока.

В связи с вышеописанным, выбранная мной тема актуальна, т.к. решает следующие задачи: десятиканальный источник тока позволяет регулировать величину силы тока в широком диапазоне для осаждения различных металлов с разной скоростью; появляется возможность питать несколько гальванических ванн одним источником, который можно произвести на любом отечественном предприятии, не закупая дорогое иностранное оборудование; источник тока имеет небольшие габариты, прост в освоении, обладает хорошей ремонтпригодностью и подключается к бытовой сети «220В», что позволяет использовать его без долгой подготовки сотрудников на любом предприятии.

Целью данной работы является разработка многоканального источника тока для гальванического осаждения и оценка его надежности. В качестве примера рассмотрен десятиканальный источник тока.

В литературной части работы был проведён обзор процесса гальванического осаждения, показатели качества гальванических покрытий и технологическое оборудование для нанесения электрохимических покрытий.

В работе был рассмотрен способ нанесения гальванических покрытий, для которого требовалось разработать десятиканальный источник тока. На основе этого анализа были сформированы требования к разрабатываемому источнику тока, были выбраны необходимые пакеты прикладных программ.

В конструкторской части работы была разработана топология печатной платы, используемой в источнике тока, подобран оптимальная. Далее был проработан и смоделирован оптимальный конструктив, отвечающий требованиям технического задания.

Далее был проведен анализ надежности разработанного источника тока.

Результаты проделанной работы предполагается использовать при разработке комплекта конструкторской документации, по которому можно изготовить десятиканальный источник тока, а также для расчета устройства и выборе методов проверки его работоспособности.

Список публикаций:

[1] Nekouei R. K., Rashchi F., Amadeh A. A. *Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis // Powder technology.* – 2013. – Т. 237. – С. 165-171.

[2] Белозеров Н *История гальванопластики // журнал Тайны XX века.* - 2010. - №3.

[3] *Неравновесная электрохимия в гальванотехнике [Текст] = Nonequilibrium electrochemistry in galvanotechnik / Г. А. Садаков Москва: Машиностроение, 2015 - 79 с.: ил., табл.; 22 см. - Парал, тит. с. англ. - Библиогр.: с. 76-79. - ISBN 978-5-94275-774-8.*

## Электродинамический анализ и синтез полосно-пропускающих фильтров на тонких диафрагмах со ступенчатым вырезом

Павленко Михаил Андреевич

Южный федеральный университет

Крутиев Сергей Владимирович

[mpavlenko@sfnu.ru](mailto:mpavlenko@sfnu.ru)

Широко известно, что прямоугольное окно в тонкой металлической прямоугольной мембране имеет резонанс, при этом получение контура высокого качества ограничивается пробоем из-за малых геометрических размеров резонансного окна, поэтому для создания полосовых и заграждающих фильтров используется его более сложная геометрия. Основными преимуществами таких ступенчатых пазов являются их компактность и возможность регулирования резонансной частоты передачи и Q-фактора в широком диапазоне частот.

На *рис. 1(а)* показано изображение полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на металлических прямоугольных диафрагмах с отверстием в виде вертикальной ступени. Расстояние между диафрагмами, учитывая конечную толщину металлических диафрагм и электромагнитную связь между резонансными структурами, составляло 10,38 мм. На *рис. 2* показана частотная характеристика синтезированного фильтра, с размерами для первых и третьих диафрагм, соответственно:  $s=11,09$  мм,  $w=5,69$  мм,  $t=1,31$  мм и  $h=25,61$  мм. Размеры для центральной диафрагмы составляли:  $s=8,31$  мм,  $w=5,69$  мм,  $t=1,31$  мм и  $h=18,62$  мм.

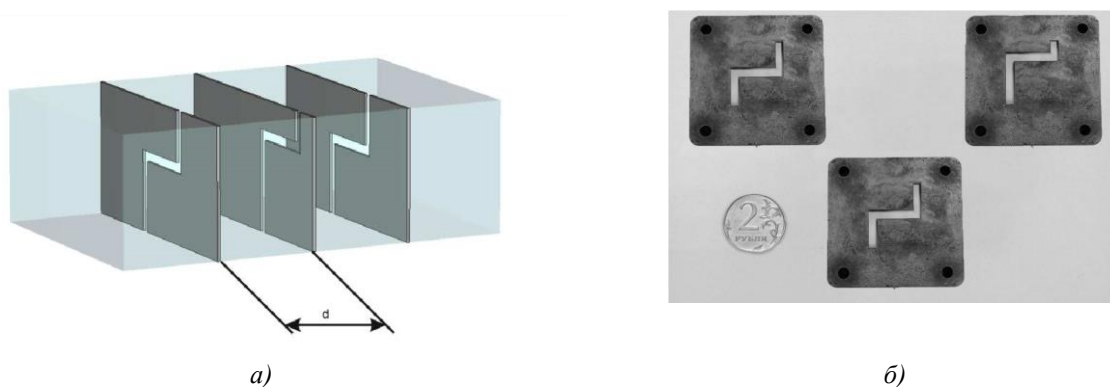


рис. 1. Модель синтезированного фильтра: а) 3D-модель фильтра; б) изготовленные диафрагмы.

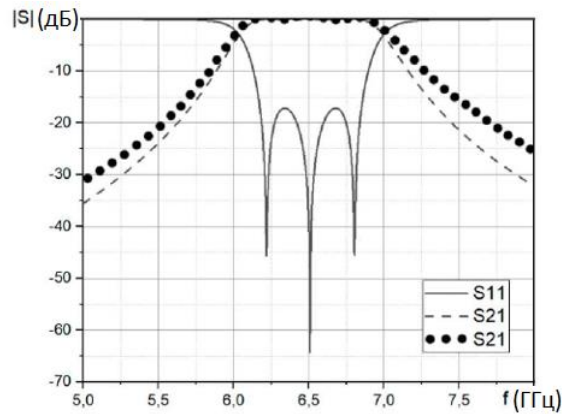


рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтра: сравнение расчетной АЧХ и экспериментальной АЧХ фильтра.

На рис. 3 представлен внешний вид полосно-пропускающего фильтра третьего порядка, выполненного на металлических прямоугольных диафрагмах с горизонтальной ступенькой. Размеры полученного полосового фильтра для первого и третьего отверстий соответственно:  $s = 30,00$  мм,  $w = 6,33$  мм,  $t = 0,60$  мм,  $h = 6,64$  мм. Для центральной диафрагмы:  $s = 27,24$  мм,  $w = 5,92$  мм,  $t = 0,60$  мм,  $h = 6,64$  мм.

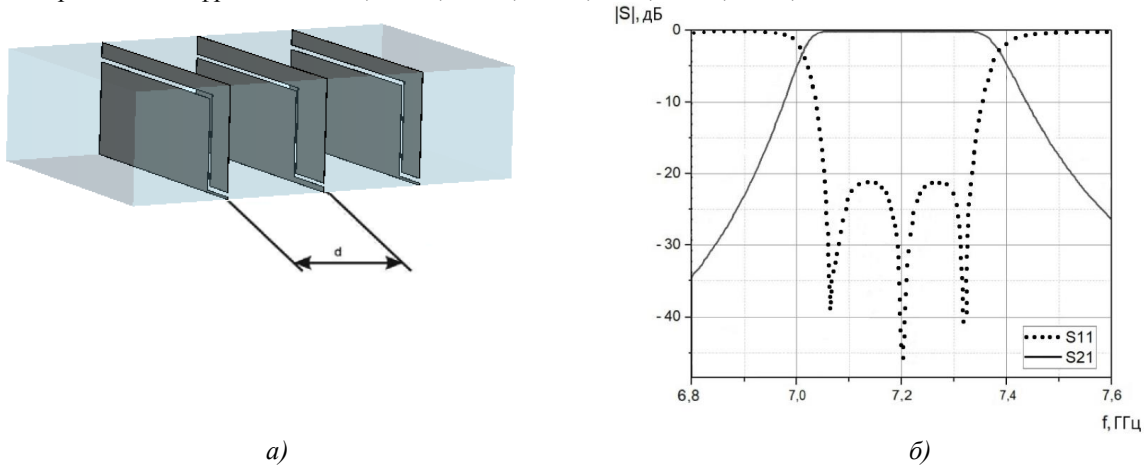


рис.3. Фильтр с горизонтальным ступенчатым вырезом: а) 3D-модель фильтра; б) амплитудно-частотная характеристика фильтра.

## Спектры поглощения СВЧ энергии композитами, содержащими сегнетоэлектрик

*Пандов Даниил Дмитриевич*

*Южный федеральный университет*

*Сидоренко Евгений Никифорович, к.ф.-м.н.*

*[dan.pandov@mail.ru](mailto:dan.pandov@mail.ru)*

Разработка новых высокоэффективных радиопоглощающих материалов в настоящее время весьма актуальна. Радиопоглощающие материалы широко применяются для изготовления деталей приборов и конструкций, которые могут защищать биологические объекты от электромагнитного излучения, улучшать противолокационную маскировку различных объектов, уменьшать помехи, защищать компьютерные системы обработки информации от несанкционированного доступа, конструировать безэховые камеры. При разработке радиопоглощающих материалов используются такие материалы, которые обладают высокой удельной электропроводностью и большими диэлектрическими и магнитными потерями. Применяют разнообразные материалы: проводники, полупроводники, сегнетоэлектрики, ферриты, композиты. Среди них особое место занимают композиты с сегнетоэлектриками в качестве внедренной компоненты [1,2].

В настоящей работе при комнатной температуре исследованы радиопоглощающие свойства ряда новых мультиферроидных объемных композитов. Они содержат перовскитоподобный манганит лантанастронция  $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$  (LSMO) и сегнетоэлектрик - титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  различной концентрации с 5% -ной добавкой оксида германия  $\text{GeO}_2$ . Исследования спектров поглощения СВЧ энергии выполнены в диапазоне частот 3,2 –

12 ГГц. Волноводный тракт, подключаемый к генератору с индикатором, состоял из 2-х направленных ответвителей, симметричной микрополосковой линии и 50-омной нагрузки. Широкополосная микрополосковая линия использовалась в качестве измерительной ячейки. На ее поверхности в области центрального проводника линии располагался измеряемый образец [3]. Образцы без электродов, изготовленные в форме таблетки, имели диаметр 11 мм и высоту 1,7 мм.

Полученные спектры поглощения энергии для композитов с различной концентрацией LSMO и BaTiO<sub>3</sub> представлены на рисунках 1 и 2.

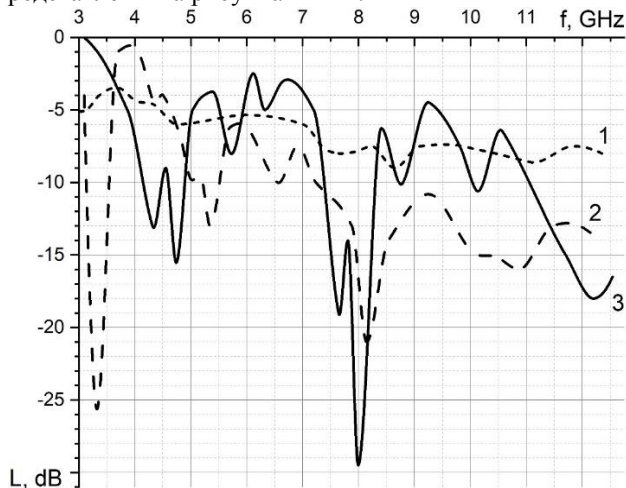


рис.1. Спектры поглощения СВЧ энергии композитами: BaTiO<sub>3</sub> - 95%, GeO<sub>2</sub> - 5% – (1), BaTiO<sub>3</sub> - 80%, LSMO - 15%, GeO<sub>2</sub> - 5% – (2) и BaTiO<sub>3</sub> - 75%, LSMO - 20%, GeO<sub>2</sub> - 5% – (3).

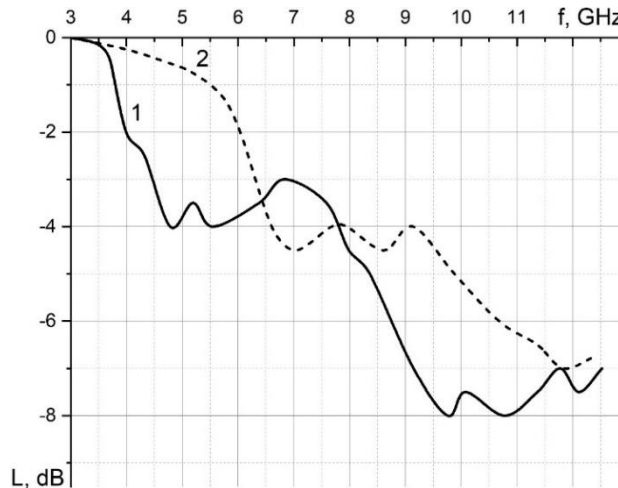


рис.2. Спектры поглощения СВЧ энергии композитами: BaTiO<sub>3</sub> - 70%, LSMO - 25%, GeO<sub>2</sub> - 5% – (1) и BaTiO<sub>3</sub> - 60%, LSMO - 35%, GeO<sub>2</sub> - 5% – (2).

Из эксперимента следует, что для образцов композитов с концентрацией манганита 0, 25 и 35% характерно небольшое поглощение энергии ( $L \leq -8$  дБ). Композит с концентрацией BaTiO<sub>3</sub> равной 95% близок к керамике чистого титаната бария. Известно, что поглощение энергии электромагнитного поля неполяризованной керамикой BaTiO<sub>3</sub> не находящейся под механическим напряжением невелико. В кристаллах BaTiO<sub>3</sub> с разнообразной доменной структурой, за исключением кристаллов BaTiO<sub>3</sub> со сложной доменной структурой, в которой преобладают группы мелких *a*- и *c*-доменных клиновидных двойников, ориентированных по нескольким системам двойникования в пределах каждой из групп, также наблюдается равномерное поглощение энергии во всем диапазоне частот на уровне – (3-10) дБ [3].

Спектры поглощения композитов с концентрацией LSMO равной 15 и 20% сильно изрезаны, имеют многочисленные узкополосные максимумы поглощения, в том числе и очень большие, где поглощение энергии достигает – (25-30) дБ. Известно, что в композитных сегнетоэлектриках в зависимости от типа и концентрации второй компоненты изменяется спонтанная поляризация, коэрцитивное поле, доменная структура, диэлектрическая восприимчивость, смещается точка Кюри [2]. По-видимому, в образцах с концентрацией LSMO 15 и 20% возникают механические напряжения, вызывающие образование групп мелких доменных клиновидных двойников с различными пьезорезонансными частотами. При совпадении этих частот с частотой электромагнитного поля двойники осциллируют, поглощая энергию.

В спектрах поглощения композитов с большей концентрацией LSMO равной 25 и 30% вклад резонансных процессов практически не наблюдается, очевидно, из-за демпфирования доменных двойников более сильным механическим напряжением или из-за ослабления сегнетоэлектрических свойств в этих композитах.

Таким образом, экспериментально показано, что среди мультиферроидных композитов ряда, содержащих титанат бария, имеются композиты со спектрами резонансного типа с большими узкополосными максимумами поглощения энергии, достигающими – (25-30) дБ.

Список публикаций:

- [1] Sidorenko E.N., Privalov E.E., Demchenko A.A., Kabirov Yu. V., Chebanova E.V., Nathin I.I.// Conference Proceedings -2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe. P.464 – 467.
- [2] Nguyen Hoaí Thu'ng, Сидоркин А.С., Миловидова С.Д.// Физика твердого тела, 2018, том 60, вып. 3. С. 553-559.
- [3] Sidorenko E. N., Rudskaya A. G., Babenko A. A., Natkhina I. I., Galatova A. O., and Rudsky D. I. // Ferroelectrics 2023, Vol. 606/P. 50-60.



## Расчёт погрешностей схемы генератора тестовых сигналов для электрокардиографов и кардиомониторов

Попов Михаил Дмитриевич  
Южный федеральный университет  
Орлов Сергей Валентинович, к.ф.-м.н.  
[mikhail.d.popov@gmail.com](mailto:mikhail.d.popov@gmail.com)

В связи с развитием современных методов наблюдения и анализа электрокардиограмм (ЭКГ) человека встал вопрос о необходимости автоматического, без участия врача, определения уровня работы сердечно-сосудистой системы пациента. Наблюдения заключаются в измерении потенциалов электрического напряжения, возникающего при сокращении сердца и распространяющихся по тканям человека концентрическими эквипотенциальными окружностями. Для этого используют специальные средства регистрации биоэлектрической активности – электрокардиографы и кардиомониторы, которые записывают подвергаемые впоследствии анализу изменения уровня сигнала в различных частях тела. Некоторым из этих приборов необходимо проводить программную обработку измеренных значений в режиме реального времени для сигнализации о необходимости оказания экстренной медицинской помощи. Для проверки подобных устройств на работоспособность и адекватную интерпретацию получаемых ими данных необходимо воспроизведение биоэлектрических сигналов сложной формы, возникающих при нормальной или с нарушениями работе сердца [1].

В этой статье представлен один из этапов разработки генератора тестовых сигналов для электрокардиографов и кардиомониторов, предназначенного для синтеза как стандартных ЭКГ сигналов поверки [2], так и сигналов из баз данных МГТ ВИН с холтеровскими записями электрокардиограмм [3]. Сама ЭКГ человека представляет собой сигнал сложной формы с несколькими пиками с диапазоном по напряжению от  $\pm 0,1$  мВ до  $\pm 10$  мВ и частотой до 4 Гц (40 – 240 уд./мин). Методом её формирования был выбран прямой синтез с помощью ЦАП. Амплитудные и частотные характеристики синтезируемой ЭКГ основаны на требованиях, предъявляемых к самим приборам измерения [4]. Поскольку для таких сигналов требуется высокая точность, то предварительно был проведён расчёт погрешностей для схемы синтеза сигнала, представленной на (рис. 1).

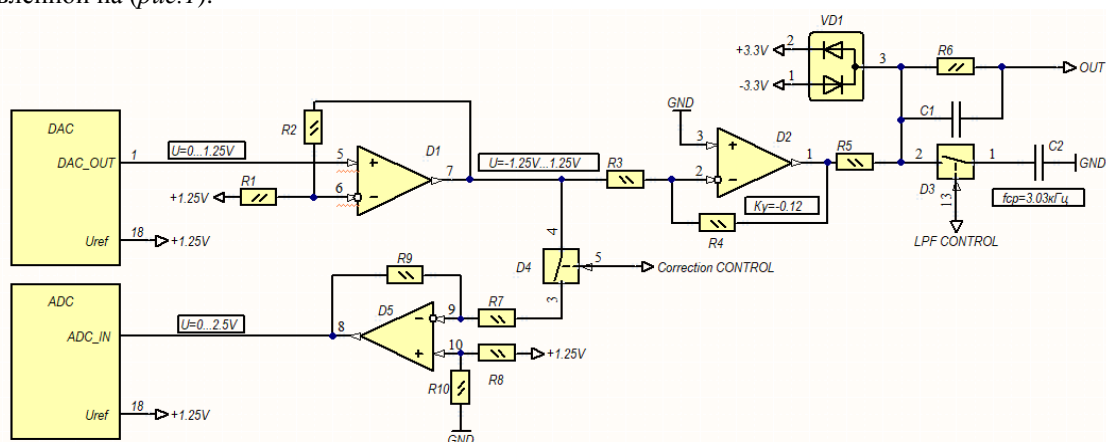


рис 1. Исследуемая часть схемы генератора

Канал формирует выходное напряжения в диапазоне  $\pm 15$  мВ с частотой дискретизации до 20 кГц и частотой сигнала до 500 Гц при включённой восстанавливающей фильтрации. Схема содержит 16-ти разрядный ЦАП, 2 операционных усилителя (ОУ), включённых в масштабирующий каскад и каскад усиления, фильтр нижних частот на RC цепочке и выходные согласующие элементы. Основной тип погрешности, важный для данной схемы является смещение напряжения, получаемое на выходе. Это связано прежде всего с высокими требованиями по точности, которые составляют в абсолютном значении  $\pm 5$  мкВ отклонения при уровне напряжения менее 5 мВ и относительные  $\pm 1\%$  для напряжения по модулю более 5 мВ. Расчёт суммарной погрешности на одном канале производился в несколько этапов. Все отклонения параметров микросхем и отклонения от идеальных значений номиналов элементов брались из соответствующих технических спецификаций на них, учитывая использование в лабораторных условиях.

Первый этап состоит в нахождении напряжения на выходе ЦАП с учётом всех вносимых им искажений. Основные составляющие искажений это отклонение опорного напряжения, дифференциальная ошибка ЦАП, смещение напряжения ЦАП. На втором этапе идёт расчёт погрешности масштабирующего усилителя. Для него важны разброс номиналов резисторов и смещение напряжения на ОУ. По расчётам после второго этапа накапливается наибольшая часть погрешности, поэтому для предварительного определения смещения на выходе



первого каскада введена цепь с восстанавливающим ОУ и АЦП. После определения смещения происходит перерасчёт предыдущих значений. На третьем этапе необходимо учесть добавление погрешности от каскада усиления и восстанавливающих фильтров.

С учётом коррекции на выходе рассчитаны следующие отклонения от предполагаемого напряжения:  $\pm 2.1$  мкВ или 0.41% относительно 0.5 мВ. Полученные теоретические результаты сравнивались с измерениями, сделанными на макете. Они показали, что формируемый сигнал соответствует заданным требованиям. Из этого был получен вывод о верности рассчитанных значений и необходимости введения дополнительных цепей коррекции.

Список публикаций:

[1] Mounaim Aqil, Atman Jbar., ECG Generator for Educational Biomedical Engineering Laboratory // *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, Vol. 18, No. 02 - 2022.

[2] Межгосударственный стандарт. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик регистрирующим и анализирующим одноканальным и многоканальным электрокардиографам. ГОСТ IEC 60601-2-51-2011

[3] G.B. Moody. R.G. Mark. The impact of the MIT-BIH arrhythmia database // *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 20 (3) 45–50 - 2001.

[4] Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Электрокардиографы, электрокардиоскопы и электрокардиоанализаторы. Методика поверки. Р 50.2.009—2011. – 2013.

## **Разработка антенного устройства для комплекса устройств на базе технологии LoRa**

**Саблин Михаил Сергеевич**

*Дальневосточный федеральный университет*

*Полянский Дмитрий Александрович, к.ф.-м.н.*

[michaelsablin5@gmail.com](mailto:michaelsablin5@gmail.com)

LoRa – это технология передачи данных со скоростью 0,3-50 кб/с с низким энергопотреблением для дальних дистанций (от 1 до 15 км). Она использует широкий диапазон частот и различные уровни модуляции для обеспечения высокой эффективности связи на больших расстояниях. LoRa использует безлицензионные радиочастотные диапазоны ниже 1 ГГц:

- EU433 (433,05-434,79 МГц) и EU863-870 (863-870 / 873 МГц) в Европе;
- US902-928 (902—928 МГц) в Северной Америке.

В России частотный диапазон для работы по протоколу LoRaWAN (но не только по этому протоколу, так как в этом же диапазоне Решением ГКРЧ допускается работа устройств LPWAN и по другим протоколам) состоит из двух разрешенных поддиапазонов: 864 - 865 МГц и 868,7 - 869,2 МГц. В общем же в Российской Федерации для LoRa выделен диапазон 868 МГц. Поддиапазон 868,7 - 869,2 МГц будет более предпочтителен, поэтому и будет выбран.

Лавинные маячки, работа над которыми ведется нами, будут использовать модуляцию LoRa (Long Range), и предназначены для поиска заваленных под лавинами людей, а также, при использовании связки маячок+дрон, для поиска потерявшихся людей в горно-лесистой местности. Они включают в себя LoRa-модуль, микроконтроллер, антенну, источник питания (обычно батарею) и, возможно, другие датчики (например, акселерометр для обнаружения движения или вибрации). Маячки периодически отправляют сигналы, предоставляя спасателям информацию о местоположении пострадавших, что помогает быстро и точно организовать операции по спасению. Для разрабатываемой нами системы предусмотрены два типа устройств – индивидуальные универсальные двухрежимные маячки и базовая станция повышенной мощности для более эффективной связи с маячками в случае необходимости.

Для эффективной работы маячков в условиях лавин необходима хорошая антенно-фидерная система. Это включает в себя не столько саму антенну на маячке, сколько антенну базовой станции на стороне спасателей, обеспечивающую максимально дальнюю передачу сигнала и эффективность приёма сигналов от локальных маячков. Поскольку лавины могут создавать сложные условия для передачи сигналов (например, металлические или снежные преграды), важно иметь антенны, спроектированные для преодоления этих проблем.

Направленная антенна предназначена для усиления сигнала в определенном направлении и уменьшения его в других направлениях. Её основной задачей является фокусировка энергии в конкретном секторе пространства, что обеспечивает более высокую директивность по сравнению с всенаправленными антеннами.

Основная цель использования направленных антенн заключается в увеличении дальности связи и повышении производительности системы связи за счет эффективного управления направленностью излучаемого или принимаемого сигнала. Это особенно важно в ситуациях, когда требуется обеспечить связь на большие расстояния, улучшить качество сигнала или снизить воздействие помех.

Направленные антенны находят широкое применение в различных областях, таких как беспроводные сети, радиосвязь, радиолокация, спутниковые системы и другие технологические сферы, где эффективное управление направлением сигнала является критическим фактором. Эти антенны могут иметь разнообразные формы и конструкции, включая параболические антенны, секторные антенны, Яги-антенны и др.

Для поддиапазона 868,7–869,2 МГц нами была выбрана антенна Яги-Уда, так как она обеспечивает более высокую направленность, точность и компактность, а также отлично подходит для работы с точно известным и постоянным диапазоном частот.

В данной работе будет использована антенна с параметрами: частота  $f$ : 869 МГц, длина волны  $\lambda$ : 345 мм, диаметр элемента  $d$ : 4 мм, диаметр стрелы  $D$ : 15 мм, общее число элементов: 5, длина стрелы: 239 мм, усиление: 10 dBi (прибл.), длина рефлектора  $R$ : 172 мм, длина вибратора  $F$ : 163 мм, бум с круглым поперечным сечением.

Теперь необходимо определить дальность связи, которую будет обеспечивать данная антенна, по формуле (1):

$$D = 3.57 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

где  $h_1$  – высота первой антенны (маячка),  $h_2$  – высота второй антенны (БС).

Примем высоту антенны маячка  $h_1 = 0$  м, а высоту антенны БС, высота второй антенны (БС), которая расположена на дроне должна соответствовать расстоянию от центра до максимального сечения конуса основного лепестка, примем ее  $h_2 = 50$  м. На рисунке 1 приведена диаграмма направленности влияющая на высоту второй антенны.

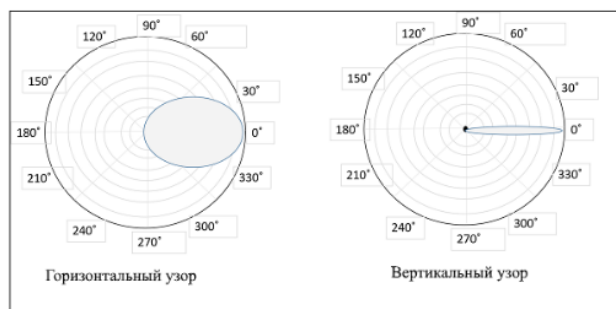


рис. 1. Диаграмма направленности антенны Яги-Уда

$$D = 3.57 \cdot (\sqrt{0} + \sqrt{50}) = 25 \text{ км}$$

Также необходимо определить, сможет ли связь с коэффициентом усиления 10 dBi нормально работать через 20–30 м снега. Для этого воспользуемся графиком зависимости потерь сигнала от частоты в сухом снегу (лавина), представленном на рисунке 2. Тут следует отметить, что такая толщина снега является редким, почти исключительным явлением при сходах лавин, и взята в качестве расчетной для получения максимально уверенной связи на толщинах, обычных для основной массы лавин.

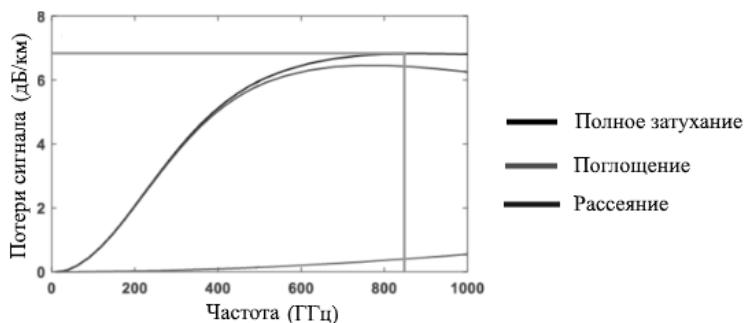


рис. 2. Зависимость потерь сигнала от частоты в сухом снегу

По рисунку 2 определим, что на частоте 869 МГц потери сигнала составят 6,8 дБ/км. Переводя в метры получим 0,2 дБ. В итоге с учетом ослабления коэффициент усиления будет составлять 9,8 dBi, что соответствует нормальной работе связи.

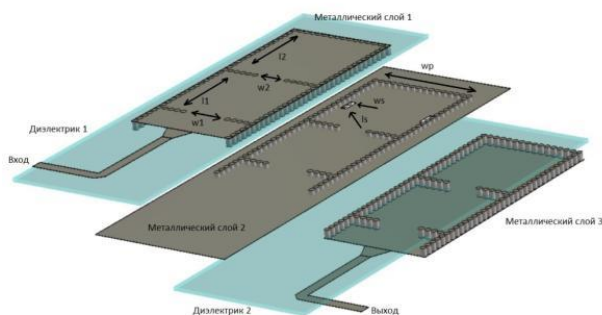
Маячки отправляют периодические сигналы с информацией о своем местоположении. Спасательная группа, оборудованная приемником LoRa, может обнаруживать и распознавать эти сигналы, определять расстояние до маячка и, используя несколько маячков в режиме поиска, вычислять местоположение находящихся под снегом устройств. Это позволяет спасателям быстро определить зоны поиска и обеспечить более эффективные операции спасения. Важно отметить, что точность и эффективность системы зависят от множества факторов, таких как топология местности, погодные условия и диапазон работы выбранной частоты LoRa. Также разработка предусматривает пассивный режим работы маячка, который отправляет ответный сигнал при получении поискового сигнала, отправляемого с маячка, находящегося в активном поисковом режиме.

## Самоподавление паразитного режима более высокого порядка в фильтре, выполненном по SIW технологии

**Сабурова Валерия Сергеевна**  
Южный федеральный университет  
Крутыев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.  
[lera.saburova.18@mail.ru](mailto:lera.saburova.18@mail.ru)

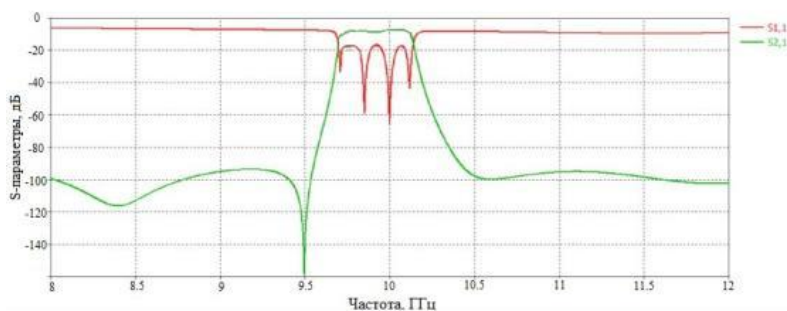
В статье предлагается новый способ борьбы с паразитными частотами в фильтрах, выполненных по SIW технологиям [1-2]. Используется двухслойная структура, где связи мод более высокого порядка усиливаются, за исключением центральной, которая минимизируется. Этот подход позволяет эффективно устранять паразитные сигналы, с помощью эффекта самоподавления, обеспечивая лучшую производительность и простоту в реализации.

Полосовой фильтр, выполненный по SIW технологии, - это волноводная структура, состоящая из двух рядов металлических штырей, соединяющих две металлические пластины, ограничивающие диэлектрическую подложку. Два резонатора и двойная диафрагма используются для минимизации только центральной связи с режимом более высокого порядка. В результате получается двухслойная структура фильтра, представленного на *рис. 1*. [3-4]



*рис. 1* Топология фильтра

Устройство сделано с использованием подложки с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,2$  и толщиной  $h = 0,508$  мм, а также металлизации толщиной 35 мкм. Размеры фильтра следующие:  $w1 = 6,53$  мм,  $w2 = 4,98$  мм,  $l_s = 2,4$  мм,  $w_s = 0,9$  мм. Длина  $l1$ ,  $l2$  и ширина резонаторов равны 13,58 мм, 14,51 мм, 15,3 мм соответственно. Результаты амплитудно-частотной характеристики фильтра представлены на *рис. 2*.



*рис.2* Амплитудно-частотная характеристика

В данной статье представлен метод подавления паразитной полосы, генерируемой модами более высокого порядка встроенного в подложку SIW-фильтра. Результаты предлагаемого метода, в котором минимизируется только центральная связь с паразитным резонансом, показывают его эффективность.

Список публикаций:

[1] Xiao, Ping, Chen and K. Wu, "Substrate integrated waveguide (SIW) Filter: Design techniques and structure innovations," *IEEE Microw.*, vol. 15, no. 6, pp. 121-133, Sep. 2014.

[2] C. Tomassoni, L. Silvestri, M. Bozzi, and L. Perregrini, "Substrateintegrated waveguide filters based on mushroom-shaped resonators," *International Journal of Microw. Wireless Techn.*, vol. 8, no. 4-5, pp. 741-749, 2016.

[3] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, A., Sdobnova, V. Synthesis of Band-Pass Filters Made Using SIW Technology // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 118-122

[4] Krutiev, S., Lonkina, D., Makhno, P., Sdobnova, V. Narrow-Band Waveguide Filter on Complex Resonant Diaphragms // 2022 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2022, 2022, pp. 108-111

## Самобалансирующий робот

Садыков Раиль Расимович

Уфимский университет науки и технологий

Шарипов Талгат Ишмухамедович, к.ф.-м.н.

[rail40981@gmail.com](mailto:rail40981@gmail.com)

Работа посвящена созданию самобалансирующегося робота на основе платы Arduino [1, 2], принцип балансировки которого основан на обратном маятнике (рис.1). Принцип действия разрабатываемой модели аналогичен таковому в самобалансирующихся скутерах от Segway.

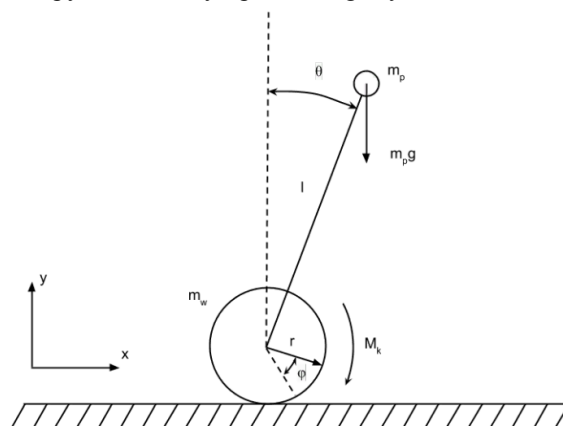


рис.1. Система обратного маятника.

Маятник – это масса  $m_p$ , прикрепленная на конце невесомого стержня длины  $l$ . На другой конец стержня прикреплен двигатель, развивающий максимальный момент  $M_k$  и передающий его на колесо массой  $m_w$  и радиусом  $r$ . Соответственно, основная задача управления – это стабилизировать маятник в вертикальном положении.

Дополнительно для усложнения проекта мы поставили еще одну задачу: робот должен будет уметь проходить лабиринт. Для реализации были использованы следующие компоненты:

1. Плата Arduino Uno.
2. Модуль драйвера мотора L298N (L298N Motor Driver Module).
3. GY-521 модуль (акселерометр и гироскоп) на базе микросхемы MPU-6050.
4. Ультразвуковой дальномер HC-SR04.

Структурная схема самобалансирующегося робота на основе платы Arduino представлена на рисунке 2.

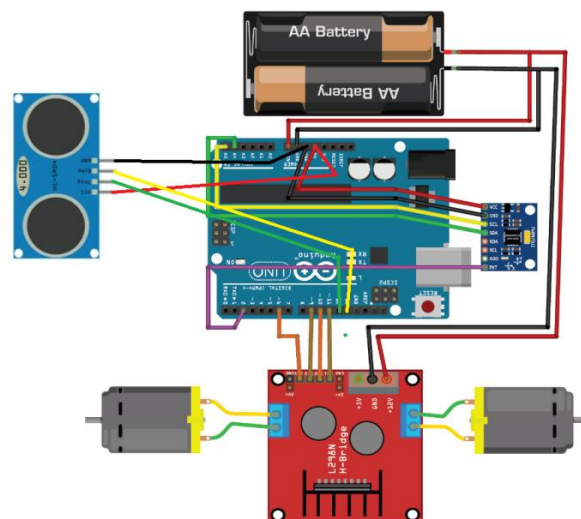


рис.2. Структурная схема самобалансирующегося робота.

Шасси робота пока еще не реализованы, но планируется их изготовление на основе 3D печати. Макет шасси выполнен и отмоделирован в специализированной программе.

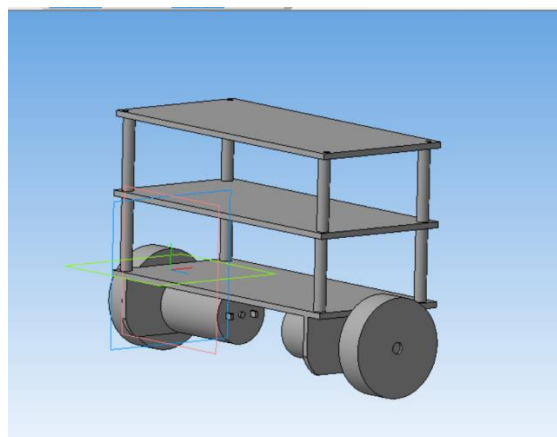


рис.3. Примерный макет шасси робота, спроектированный в системе Компас 3D.

Планируется, что все напечатанные компоненты и электроника будут собраны в единое шасси. Также будет написан программный код управления роботом, который позволит нашему роботу находить выход из лабиринта.

Список публикаций:

[1] Петин В.А. Проекты с использованием контроллера *Arduino*. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ – Петербург, 2015. – 464 с.:ил – (Электроника).

[2] Мочалов А.Н., Вафин Д.А., Валиев Д.А., Шарипов Т.И. Новые способы построения современных роботов. // *Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции «Уфимская осенняя математическая школа-2023»: тезисы докладов XIV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной посвящённой 75 - летию юбилею профессоров Я.Т. Султанаева и М.Х. Харрасова – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2023 – с. 79.*

# Полосовой фильтр с входным поглощающим резонатором квазиэллиптического типа

Уварова Виталина Андреевна

Южный федеральный университет

Крутыев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

[viuvarova@sfedu.ru](mailto:viuvarova@sfedu.ru)

В данной статье предлагается фильтр квазиэллиптического типа 2-го порядка с двумя нулями пропускания, близких к полосе пропускания, на основе модели диплексера и извлеченных полюсных резонаторов. Эквивалентная схема этой конструкции включает в себя два канала, каждый из которых разделен на две подсети, состоящие из полосно-пропускающих резонаторов и полосно-заграждающих резонаторов. Полосно-заграждающий канал состоит из двух выделенных полюсных полосно-заграждающих резонаторов, отражающих мощность в полосе частот. Полосно-пропускающий канал имеет два каскадных полосно-пропускающих резонатора, включая одномодовый резонатор и резонатор с двойным поведением, отвечающий за введение нулей отражения [2–5].

Был проведен электродинамический анализ и синтез квазиэллиптического типа 2-го порядка с двумя нулями пропускания. На Рис. 1. представлен чертеж волноводного устройства с общим размером 42x34,8мм. Вся конструкция имеет ту же ширину, что и WR-28, которая составляет 7,12 мм [1]. Амплитудно-частотная характеристика изучаемого фильтра представлена на рис.2.

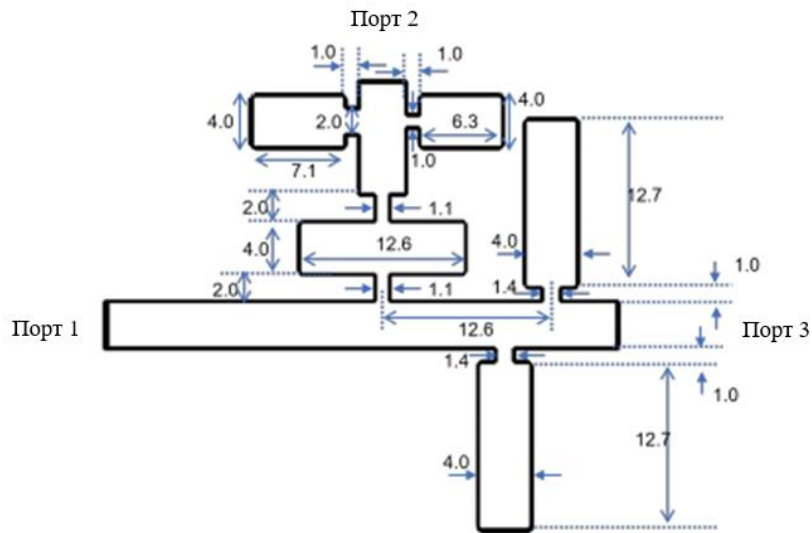


рис.1 – Чертеж волноводного устройства

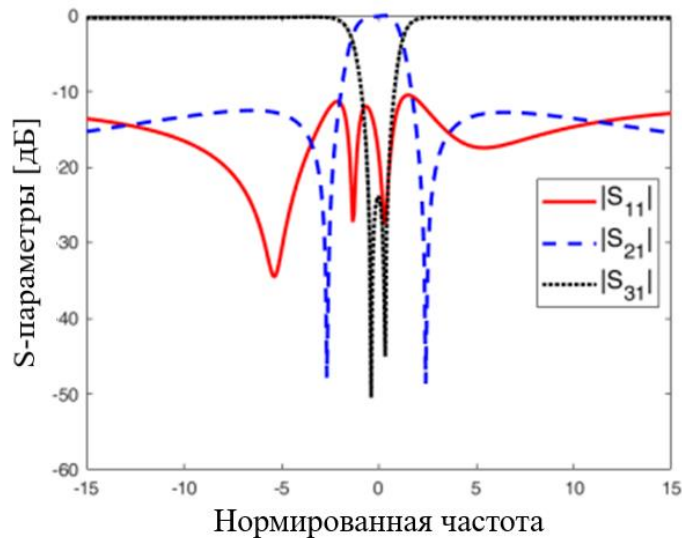


рис.2 – АЧХ фильтра



Таким образом, был спроектирован, смоделирован металлический полосовой фильтр с входным поглощающим резонатором квазиэллиптического типа 2-го порядка на основе волновода WR-28.

Список публикаций:

- [1] X. Chen, K. Wu, and Zh. Li, "Dual-Band and Triple-Band Substrate Integrated Waveguide Filters With Chebyshev and QuasiElliptic Responses" *IEEE Trans. Microw. Theory*, VOL. 55, NO. 12, PP. 2569-2578, 2007.
- [2] Sergey V. Krutiev; Daria V. Lonkina; Svetlana S. Efremova; Andrey S. Ipatiev *Electrodynamic Analysis and Synthesis of Bandpass Filters on a Rectangular Waveguide with Complex Thin Resonant Diaphragms in the Form of a Double-Shaped C-aperture // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 28 June 2021 - 02 July 2021, DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494046
- [3] S. V. Krutiev; D. V. Lonkina; P. V. Makhno; A. B. Kleshchenkov; V. V. Makhno *Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR) // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 25-29 April 2022, DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792588
- [4] Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F., Krutiev, S.V., Tyaglov, M.Y. *Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, 61(12), pp. 915–923, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09947-0>
- [5] Viacheslav Zemlyakov, Sergey Krutiev, Mikhail Tyaglov, Valery Shevchenko *A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2019, 47(1), pp. 55–64, DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.2566>.

## **Исследование возможности применения токопроводящего клея для монтажа активных бескорпусных элементов**

**Филипченко Елизавета Станиславовна**

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Семенов Геннадий Алексеевич, к.т.н.*

[povarova.elizaveta@mail.ru](mailto:povarova.elizaveta@mail.ru)

Данное исследование направлено на улучшение качества технологического процесса микросборок путем замены пайки бескорпусных элементов, технологией приклеивания токопроводящим клеем для защиты бескорпусных элементов от воздействия флюса. В связи с этим, данное исследование может быть перспективно и актуально для дальнейшего производства, которое может быть налажено на предприятии.

Токопроводный клей используется для соединения чипа с печатной платой, кристалла с подложкой. Электрическое соединение, при этом, осуществляется проволочными выводами. Нужный объем клея, в соответствии с размером площади, наносится методом трафаретной печати, штамповки, прямого нанесения клея на компонент или дозировки за счет тонкой полый иглы. После нанесения на компонент.

При склеивании большинство клеев допускают варьирование температуры и времени в широких пределах, причем при повышении температуры время отверждения клея быстро уменьшается. Режим холодного отверждения осуществляется при комнатной температуре, но требует длительной выдержки (до 48 ч). Поэтому склеивание, как правило, выполняют с подогревом от 60 до 200 °С, в зависимости от марки клея.

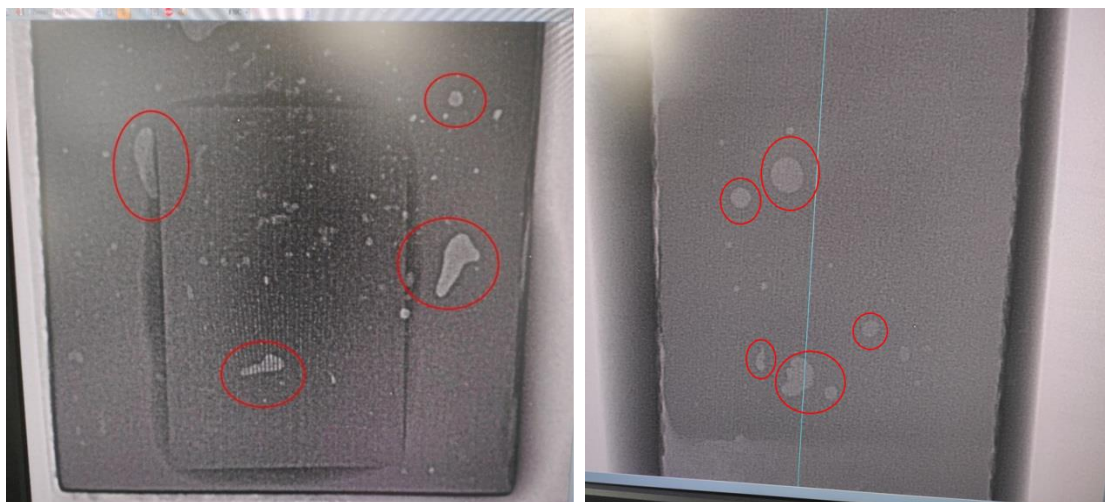


рис.1 Рентген пайки кристалла (слева) и приклеивания кристалла (справа)

Особенности и преимущества предложенного способа:

- Токопроводящий клей обладает повышенной электрической проводимостью, которая обеспечивается мелкими металлическими частицами, содержащимися в составе клея;
- Надежно соединяет склеиваемые поверхности;
- Хранятся и перевозятся при комнатной температуре.

Были проведены опыты с приклеиванием и пайкой кристаллов, которые представлены на изображениях. На обоих изображениях обведены области, содержащие на пустоты и полости в пайке и в клеевом слое.

Из выше представленного можем сделать выводы, что приклеивание кристалла более предпочтительно, так как при этом обеспечивается лучшая адгезия, обеспечивается лучшее электрическое и механическое соединение, а также обеспечивается более качественный отвод тепла.

## Выбор антенны для приема ионограмм на трассах наклонного ЛЧМ зондирования

**Черкасов Петр Витальевич**

*Южный федеральный университет*

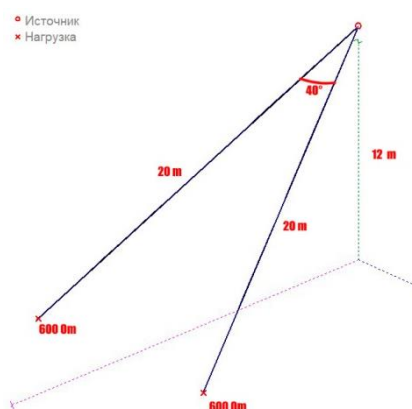
*Вертоградов Геннадий Георгиевич, д.ф.-м.н.*

*[pcherkasov@sfedu.ru](mailto:pcherkasov@sfedu.ru)*

Наклонное ЛЧМ зондирование (НЗ) остается актуальным методом исследования ионосферы, которое помогает в повышении надежности и эффективности радиозлектронных систем различного назначения в реальном времени, так как ионосферная плазма обладает постоянной изменчивостью характеристик. Для получения точных данных о состоянии ионосферы необходимо использовать специальные антенны, которые обеспечивают достаточную чувствительность для приема слабых сигналов, отраженных от ионосферы во всем диапазоне зондирования ионосферы (2–30 МГц) [1-2].

В этой статье представлен анализ 2-х популярных антенн, используемых для НЗ в условиях ограниченного пространства. Это 9-метровая штыревая и V-образная антенны, обладающие простой конструкцией, низкой стоимостью, широким диапазоном рабочих частот.

Антенны были промоделированы в программе MMANA-GAL. Длина проводников 20 метров, угол раскрытия 40°, нагрузка на концах проводников по 600 Ом. Вид антенны представлен на *рис.1*. АЧХ, полученные из программы для V-образной и штыревой антенн приведены на *рис.2а* и *рис.3а* соответственно.



*рис.1. V-образная антенна*

На два вида антенн были приняты ионограммы на трассе Кипр-Ростов-на-Дону(1470км). Исследования проводились в период с октября 2023 года по декабрь 2023 года включительно. Передатчик на Кипре работал в диапазоне частот 8÷30 МГц, скорость перестройки частоты составляла 100 кГц/с. Приём сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) осуществлялся в Ростове-на-Дону с помощью ионозонда [3]. Регистрация квазимгновенных АЧХ выполнялась на протяжении часа для каждой антенны. Сначала 30 минут (6 ионограмм) регистрировалась АЧХ на одну антенну. Затем приемник переключался на вторую антенну. И также регистрировалось 6 ионограмм. Далее процедура повторялась еще один раз. Впоследствии для каждой антенны вычислялась средняя за час АЧХ путем усреднения 12 квазимгновенных АЧХ. Примеры полученных АЧХ для каждой из антенн показаны на *рис.2б* и *рис.3б*. Отметим, чтобы достичь максимального диапазона частот



измерения АЧХ и в максимальном частотном интервале сравнить эффективность применения антенн для задач ЛЧМ зондирования, измерения выполнялись в полуденные часы суток.

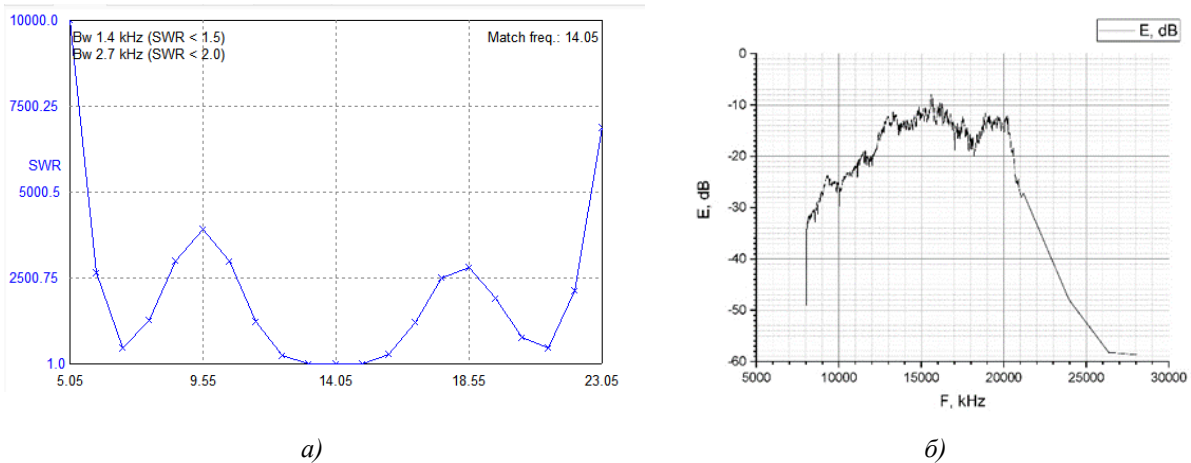


рис.2. График зависимости КСВ (а) от частоты (в МГц), и АЧХ (б) для V-образной антенны

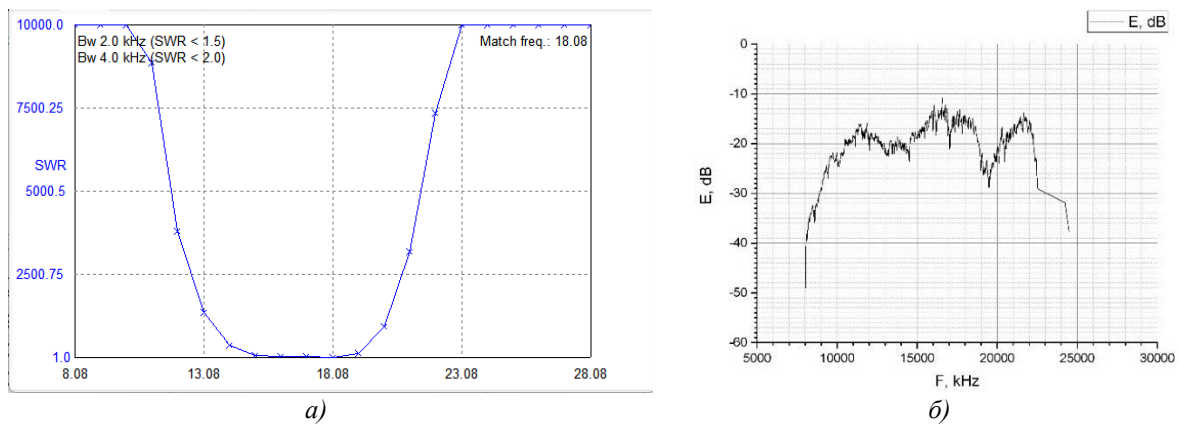


рис.3. График зависимости КСВ (а) от частоты (в МГц), и АЧХ (б) для 9-метровой штыревой антенны

Также, были сняты измерения КСВ двух типов антенн с помощью векторного анализатора сетей NanoVNA v2. Полученные характеристики представлены на рис. 4.



рис.4. КСВ измеренное NanoVNA v2.

В данной работе проведено сравнение двух видов антенн - штыревой и V-образной - для приема ионограмм на трассах наклонного ЛЧМ зондирования. Было установлено, что оба вида антенн подходит для приема ионограмм. Но штыревая антенна обладает преимуществами, т. к. работает во всем диапазоне частот НЗ, имеет более простую, не занимающую много места конструкцию, и не требует сложной настройки.

Список публикаций:

- [1] Uryadov V. P., Vertogradov G. G., Vertogradova E. G. Radar observations of F-scattering in the mid-latitude ionosphere using an ionosonde radio direction finder // *Izv. Universities. Radiophysics.* – 2013. – vol. 56. – №. 1. – pp. 1-12.
- [2] Vertogradov G.G., Uryadov V. P., Sklyarevsky M. S., Valov, V. A. Oblique sounding of the ionosphere using an ionosonde radio direction finder with linear frequency modulation of the signal // *Izv. Universities. Radiophysics.* – 2016. – vol. 59. – No. 11. – pp. 991-1003.
- [3] Patent No. 2529355 Russian Federation, IPC G01S 3/95. METHOD FOR DETERMINING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF IONOSPHERIC INHOMOGENEITIES: No. 2013100642/07: application 09.01.2013: publ. 27.09.2014 / Vertogradov G.G., Uryadov V.P., Vertogradova E.G. – 14 p.

## Резонаторный диплексор Ку-диапазона

Шевченко Андрей Константинович

Южный федеральный университет

Крутиев Сергей Владимирович, к.ф.-м.н.

[ash@sfnu.ru](mailto:ash@sfnu.ru)

В многодиапазонных системах связи, например сотовой связи, диплексор является важным компонентом, а с появлением новых коммерческих систем беспроводной и мобильной связи спрос на диплексоры растет. Используются диплексоры различных типов, такие как волноводные, коаксиальные и планарные. Волноводные обеспечивают хорошие показатели по добротности, но не всегда подходят для применения в системах требующих малые массо-габаритные параметры из-за громоздких резонаторов. Использование планарных сред позволяет получить компактные устройства, но с ограниченной мощностью и большими потерями в области пропускания, когда коаксиальные резонаторы позволяют создавать устройства, у которых малые потери и возможность создания высокодобротных контуров. [1-4].

В данной работе приводится электродинамический анализ и синтез резонаторного диплексора Ку-диапазона. На *рис.1а* показан внешний вид трехмерного диплексора. Размеры готового устройства составляют 148x42x43 мм. На *Рис.2* показана амплитудно-частотная характеристика диплексора.

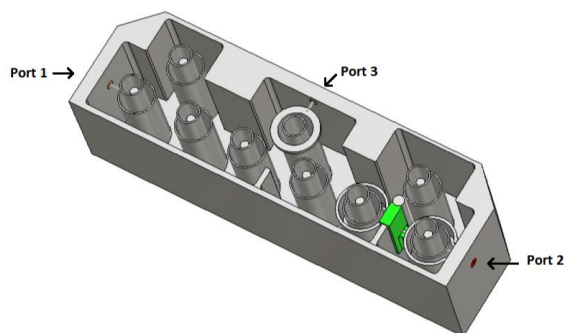


рис. 1 Модель резонаторного диплексора.

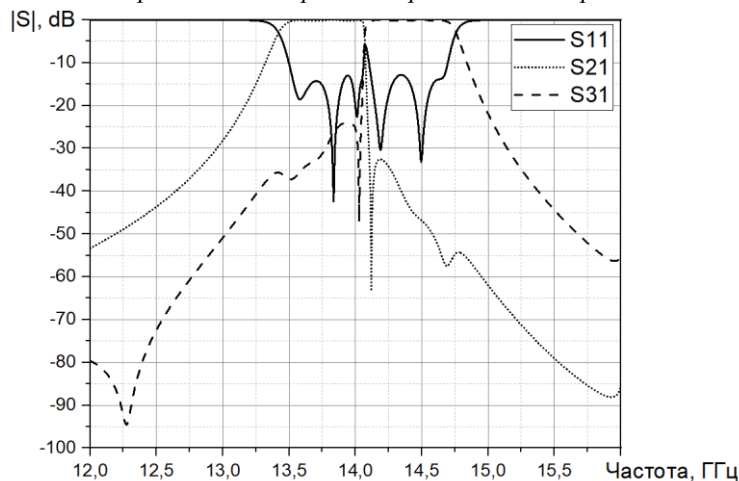


рис. 2 Амплитудно-частотная характеристика диплексора Ку-диапазона.

Список публикаций:

- [1] Sergey V. Krutiev; Daria V. Lonkina; Svetlana S. Efremova; Andrey S. Ipatiev *Electrodynamic Analysis and Synthesis of Bandpass Filters on a Rectangular Waveguide with Complex Thin Resonant Diaphragms in the Form of a Double-Shaped C-aperture // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 28 June 2021 - 02 July 2021, DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494046
- [2] S. V. Krutiev; D. V. Lonkina; P. V. Makhno; A. B. Kleshchenkov; V. V. Makhno *Design and Fabrication of Compact Waveguide Filter with Complementary Split-ring Resonators (CSRR) // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 25-29 April 2022, DOI: 10.1109/PIERS55526.2022.9792588
- [3] Zemlyakov, V.V., Zargano, G.F., Krutiev, S.V., Tyaglov, M.Y. *Electrodynamic Analysis and Synthesis of an Elliptic Filter Based on Complex Resonant Irises in a Rectangular Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, 61(12), pp. 915–923, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09947-0>
- [4] Viacheslav Zemlyakov, Sergey Krutiev, Mikhail Tyaglov, Valery Shevchenko *A design of waveguide elliptic filter based on resonant diaphragms with a complex aperture // International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2019, 47(1), pp. 55–64, DOI: <https://doi.org/10.1002/cta.2566>.

## 18 - Приборы и методы экспериментальной физики. Информационные технологии в физических исследованиях

Асылкаев Артур Марселевич, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Скоростная рентгенография ударного сжатия сплошной среды с помощью синхротронного излучения**  
Константин Алексеевич Тен  
e-mail: [a.asylkaev@g.nsu.ru](mailto:a.asylkaev@g.nsu.ru) стр. 305

Барышников Виктор Михайлович, м.н.с.  
Дубна, Объединённый институт ядерных исследований  
**Разработка онлайн мониторинга электромагнитного калориметра ECal эксперимента MPD на коллайдере NICA**  
Тяпкин Игорь Алексеевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [baryshnikov@jinr.ru](mailto:baryshnikov@jinr.ru) стр. 306

Вахрушев Артем Алексеевич, 3 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, факультет естественных наук  
**Разработка модели глубокого машинного обучения для автоматизации анализа спектров РФЭС**  
Нартова А.В.; Матвеев А.В., к.х.н.; к.х.н.  
e-mail: [a.vakhrushev1@g.nsu.ru](mailto:a.vakhrushev1@g.nsu.ru) стр. 307

Двойнишников Сергей Владимирович, зав. лабораторией  
Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, лаборатория основ безопасности  
**Системы технического зрения для науки и промышленных технологий**  
e-mail: [dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru) стр. 308

Денисюк Максим Игоревич, магистрант 1 года обучения  
Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, электроники и наноэлектроники  
**Создание энергоэффективных маячков с использованием модуляции LoRa**  
Полянский Дмитрий Александрович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [maksim.denisjuk.02@mail.ru](mailto:maksim.denisjuk.02@mail.ru) стр. 309

Зуев Владислав Олегович, аспирант 1 года обучения  
Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, отдел информационно-измерительных и управляющих систем  
**Влияние взаимного расположения оптических элементов на погрешность измерений метода фазовой триангуляции**  
Двойнишников Сергей Владимирович, д.т.н.  
e-mail: [vlad.zuev.0017@mail.ru](mailto:vlad.zuev.0017@mail.ru) стр. 310

Николайчук Илья Юрьевич, инженер  
Дубна, Объединённый институт ядерных исследований  
**Методика расчёта положения магнитной оси квадрупольных магнитов при измерениях методом вибрирующей струны**  
e-mail: [nikolajchuk@jinr.ru](mailto:nikolajchuk@jinr.ru) стр. 312

Пархоменко Марк Сергеевич, 2 курс  
Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, факультет инновационных технологий  
**Методы анализа видеопотока с использованием ML и нейронных сетей для физического анализа руды и минералов**  
Лобода Юлия Олеговна, к.п.н.  
e-mail: [parkhom1358@yandex.ru](mailto:parkhom1358@yandex.ru) стр. 313

Петухова Виктория Васильевна, 1 курс  
Екатеринбург, Уральский федеральный университет, физико-технологический институт  
**Алгоритм решения обратной задачи теплопроводности для уточнения теплофизических свойств неметаллических материалов**  
Огородников Игорь Николаевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [petukhova.viktoria@bk.ru](mailto:petukhova.viktoria@bk.ru) стр. 314

Полянский Дмитрий Александрович, доцент  
Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Институт наукоемких технологий и передовых материалов  
**Аппаратно-программный комплекс для диагностики работы системы EFI**  
e-mail: [polyanskiy.da@dvfu.ru](mailto:polyanskiy.da@dvfu.ru) стр. 315

Полянский Дмитрий Александрович, доцент  
Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Институт наукоемких технологий и передовых материалов  
**Технические каналы утечки информации, возникающие при ограничении контролируемой зоны**  
e-mail: [polyanskiy.da@dvfu.ru](mailto:polyanskiy.da@dvfu.ru) стр. 316

Сенкевич Ксения Сергеевна, 6 курс  
Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, физико-технический институт  
**Разработка устройства для оценки теплопроводности**  
e-mail: [ksusha.senkevich@yandex.ru](mailto:ksusha.senkevich@yandex.ru) стр. 317

Степаненков Антон Сергеевич, 6 курс  
Петрозаводск, Петрозаводский государственный университет, физико-технический институт  
**Система анализа температуры в помещении литейного цеха**  
e-mail: [anton.stepanenkov123@gmail.com](mailto:anton.stepanenkov123@gmail.com) стр. 318

Шалеев Артем Викторович, магистрант 2 года обучения  
Томск, Национальный исследовательский Томский государственный университет, радиофизический факультет  
**Методы предварительной обработки изображений для повышения качества регистрации в системах компьютерного зрения**  
Елизаров Алексей Игоревич, к.т.н.  
e-mail: [artem.shaleev@mail.ru](mailto:artem.shaleev@mail.ru) стр. 319

Ярцева Мария Андреевна, 4 курс  
Новосибирск, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Разработка программного обеспечения детектора SciCode**  
Глушак Анастасия Андреевна  
e-mail: [m.yartseva@g.nsu.ru](mailto:m.yartseva@g.nsu.ru) стр. 320

# Скоростная рентгенография ударного сжатия сплошной среды с помощью синхротронного излучения

Асылкаев Артур Марселевич

Новосибирский государственный университет

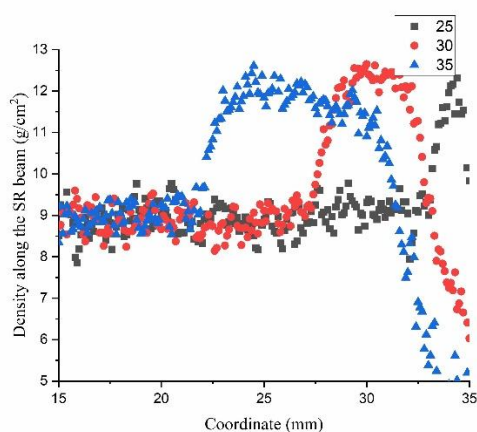
Тен Константин Алексеевич, к.ф.-м.н.

[a.asylkaev@g.nsu.ru](mailto:a.asylkaev@g.nsu.ru)

Изучение законов распространения ударных волн в конденсированном веществе: в металлах, воде и т. д. имеет большое теоретическое и практическое значение. В частности, оно необходимо для понимания и расчета взрывных явлений. Для газов расчеты термодинамических функций не вызывают больших затруднений, а теоретическое описание термодинамических свойств твердых тел при высоких давлениях (в мощных ударных волнах), представляет собой очень сложную задачу. В данной работе основное внимание уделено использованию синхротронного излучения (СИ) в динамических экспериментах. СИ позволяет проводить измерения в быстропротекающих процессах с очень малыми экспозициями (менее 1 нс).

В описываемых экспериментах источником СИ является накопительное кольцо ускорителя на встречных электрон-позитронных пучках (ВЭПП-4), которое расположено в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (энергия электронов составляет 4,5 ГэВ, индукция магнитного поля вигглера – 2 Тл). При прохождении СИ через исследуемое вещество часть излучения поглощается объектом. Излучение, проходящее без отклонения, имеет наибольшую интенсивность. Оно несет информацию о распределении плотности вещества. Важнейшим элементом измерительной системы является линейный детектор рентгеновского излучения DIMEX. Детектор позволяет фиксировать распределение плотности потока рентгеновского излучения за время, меньшее чем интервал между импульсами, и имеет 512 каналов при ширине каждого 0,1 мм. Электронная схема рентгеновского детектора позволяет запоминать 100 кадров. Для вычисления плотности исследуемого сжатого объекта проводится калибровка поглощения детектора DIMEX (для этого перед детектором ставится известная масса того же вещества). Предложенный метод позволяет сквозным образом восстановить распределение плотности вещества. По данным детектора могут быть также вычислены массовые скорости и скорости ударной волны в образце.

Пример использования СИ для взрывных экспериментов представлен на *рис. 1*. (вычислено распределение плотности фторопласта вдоль луча СИ). Фторопласт нагружался взрывом цилиндрических зарядов на основе взрывчатого вещества триаминотринитробензола диаметром 40 мм. Время между кадрами С25, С30 и С35 составляет 1 мкс. Аналогичный эксперимент был проведен для получения распределения плотности пенопласта вдоль луча СИ.



*рис.1. Распределение плотности фторопласта при ударном сжатии*

В данной работе также исследовалось распределение плотности в 3D-структурном алюминии при ударным нагружении ударниками (взрывными пушками) и взрывом зарядов ВВ диаметром 20 мм. В первых опытах с помощью данной методики было измерено относительное изменение интенсивности вдоль оси алюминия после сжатия сильной ударной волной

## Разработка онлайн мониторинга электромагнитного калориметра ECal эксперимента MPD на коллайдере NICA

**Барышников Виктор Михайлович<sup>1</sup>**

*Адхикари Риву<sup>1</sup>, Бхаттачарджи Махарнаб<sup>1,2</sup>, Дроник Виталий<sup>1,3</sup>, Дубровин Артем Юрьевич<sup>1</sup>, Дубровин Илья Сергеевич<sup>1</sup>, Головатюк Вячеслав Михайлович<sup>1</sup>, Костылев Антон Игоревич<sup>1,4</sup>, Кречетов Юрий Федорович<sup>1</sup>, Куликов Вячеслав Васильевич<sup>5</sup>, Лобастов Сергей Павлович<sup>1</sup>, Мартемьянов Максим Александрович<sup>5</sup>, Семенов Андрей Юрьевич<sup>1</sup>, Терлецкий Андрей Валерьевич<sup>1</sup>, Шутов Алексей Витальевич<sup>1</sup>, Филиппов Иван Александрович<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований

<sup>2</sup>Университет Гаухати, Гувахати, Индия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет "БелГУ"

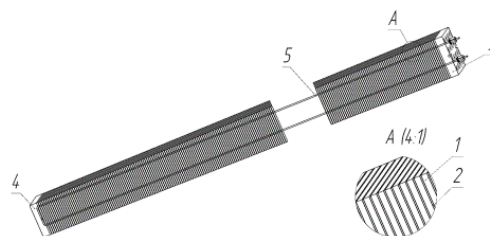
<sup>4</sup>Государственный университет "Дубна"

<sup>5</sup>Институт теоретической и экспериментальной физики

Тяпкин Игорь Алексеевич, д.ф-м.н

[baryshnikov@jinr.ru](mailto:baryshnikov@jinr.ru)

Электромагнитный калориметр ECal [1, 2] является важным компонентом эксперимента MPD [1], на коллайдере NICA в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия. Основной задачей калориметра является измерение энергии фотонов и электронов, которые образуются в процессе столкновений тяжелых ионов. ECal совместно с остальными детекторными системами позволит изучать свойства ядерной материи при экстремальных условиях. Электромагнитный калориметр представляет собой модульную цилиндрическую систему длиной около 6 метров и диаметром 4,5 метра состоящую из 25 секторов, каждый из которых включает в себя два полу-сектора. В свою очередь полу-сектор содержит 48 различных модулей 8 типов (см. *рис. 1*), электронику считывания и др. Каждый модуль ECal состоит из 16 склеенных вместе башен типа «шашлык» из чередующихся слоев сцинтилляционных и свинцовых пластин, кремниевые фотоумножители Hamamatsu S13360-6025 с высоковольтными платами (см. *рис. 1*). В пластинах имеется 16 отверстий для оптического волокна Kuraray Y11 со сдвигом длины волны (WLS). На одной стороне башни эти волокна собираются в пучок, который направляется к фотоприемникам.



*рис.1. Слева сверху - эволюция формы модуля Ecal от центра MPD к краю, слева внизу - фото модуля 8-го типа, справа - конструкция башни без WLS волокна: 1 - пластина сцинтиллятора, 2 - свинцовая пластина, 3 и 4 - пластиковые торцевые пластины, 5 — крепление*

Для проверки стабильности калориметра и дальнейшего эффективного проведения эксперимента необходим удобный инструмент мониторинга с широкими возможностями. В данной работе описывается разрабатываемая система онлайн/оффлайн мониторинга детектора ECal. Бэкенд реализован в пакете MPDRoot [3]. В качестве хранилища данных выступает база данных, основанная на PostgreSQL [4]. Фронтенд реализован на платформе с открытым исходным кодом Grafana [5] с различными плагинами. Система реализует декодирование поступающих сырых данных, их предварительную обработку и сохранение в базу данных, постобработку и визуализацию на веб-странице (см. *рис. 2*). Пользователи могут отслеживать любой из уровней электромагнитного калориметра от секторов до отдельных каналов детектора.

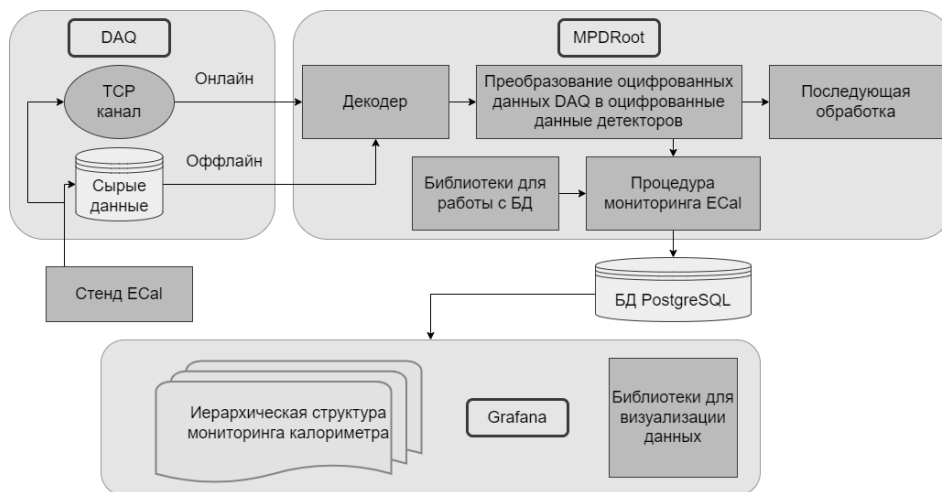


рис.2. Схема работы системы онлайн мониторинга ECal

Список публикаций:

- [1] *The MultiPurpose Detector – MPD (Conceptual Design Report), v1.4.*
- [2] Igor Tyapkin et al. // *NICA/MPD Electromagnetic Calorimeter based on Multipixel Avalanche Photodetector. // Proceeding of Science. 2016. T. 252.*
- [3] *MPDRoot project.*
- [4] *PostgreSQL.*
- [5] *Grafana.*

## Разработка модели глубокого машинного обучения для автоматизации анализа спектров РФЭС

*Вахрушев Артем Алексеевич*

*Новосибирский государственный университет*

*Нартова А.В., к.х.н., Матвеев А.В., к.х.н.*

*[a.vakhrushev1@g.nsu.ru](mailto:a.vakhrushev1@g.nsu.ru)*

Автоматизация анализа данных с использованием машинного обучения в настоящее время реализуется для самых разных физико-химических методов [1, 2]. Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) является одним из самых распространенных спектроскопических методов в катализе, материаловедении, физике полупроводников. Использование синхротронного излучения в качестве источника возбуждающего излучения позволяет существенно расширить возможности РФЭС, при этом, однако, кратно возрастает объем получаемых данных. В большинстве случаев анализ спектров проводится вручную и является времязатратным, так как существующие классические алгоритмы анализа спектров обладают высокой ошибкой отнесения пиков, особенно на зашумленных спектрах, и потому не могут быть применены для автоматизации. Однако эта задача может быть решена методами глубокого машинного обучения, так как нейронные сети способны успешно обрабатывать последовательности сигналов, находя в них закономерности и оптимизируя ручной труд.

В рамках предварительной работы для сегментации спектров РФЭС мы использовали сверточную нейросеть (convolutional neural network, CNN) [2]. Показано, что обученная модель решает две задачи, которые не могут быть решены классическими машинными алгоритмами: детектирование области пика и детектирование максимума пика. В качестве данных для обучения использовались спектры, полученные ранее научной группой в ИК СО РАН, а также был написан алгоритм для генерации искусственных спектров (рис. 1). Для валидации модели использовалась метрика Intersection-over-Union (IoU), ошибка модели на валидационном наборе данных составила 10%. Программный код предобработки и генерации искусственных спектров написан на Python 3.10, модель нейронной сети создана и обучена с помощью библиотеки PyTorch 2.2.



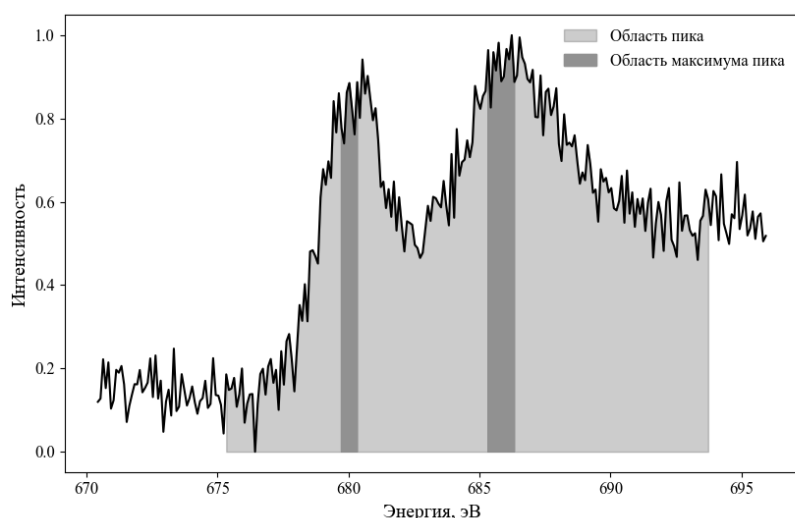


рис 1. Размеченный спектр с фоном типа Шурли

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0032), а также при поддержке Программы Приоритет-2030.

Список публикаций:

[1] Нартова А.В. и др. // *Кинетика и катализ*. 2023. Т. 64. №4. С. 457–465.

[2] Melnikov A.D., Tsentelovich Y.P., Yanshole V.V. // *Anal. Chem.* 2020. V. 92. pp. 588–592.

## Системы технического зрения для науки и промышленных технологий

*Двойнишников Сергей Владимирович*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

*[dv.s@mail.ru](mailto:dv.s@mail.ru)*

Системы технического зрения активно развиваются и совершенствуются в контексте взрывного развития информационных технологий, роста вычислительных мощностей, методов искусственного интеллекта и повышения надежности и доступности оптико-электронной элементной базы [1-3].

Задачи, решающие системы технического зрения в науке и промышленности очень разнообразны. К современным системам технического зрения относят функциональные комплексы, выполняющие широкий спектр функций: считывание меток или маркировок на продукции [4-5], измерение физических характеристик, контроль положения в пространстве [6-7], анализ внешнего вида и дефектоскопия, сортировка и отбраковка продукции [8-9].

Функциональные особенности существующих систем очень разнообразны и зависят от решаемых задач. В основном системы технического зрения делят на активные и пассивные в зависимости от использования оптического излучения в составе оптико-электронного модуля. Как правило, активные системы используются в задачах измерения геометрических или скоростных характеристик и потенциально обладают лучшими метрологическими характеристиками.

Большинство систем технического зрения в своем составе используют матричные фотоприемники и оптику, формирующую изображение контролируемого процесса. Более того, системы технического зрения, используемые на производстве имеют ограничения на время обработки данных для получения результата измерения. Поэтому, цифровая обработка изображений в реальном времени является важной частью обработки данных в системах технического зрения.

При проектировании и разработке системы технического зрения подбор оптико-электронных комплектующих, вычислительных мощностей, каналов передачи данных и алгоритмы обработки цифровых данных должны быть согласованы с задачей и обеспечивать требуемое быстродействие всей системы технического зрения.

В активных системах технического зрения часто используют монохромное излучение и узкополосную оптическую фильтрацию приемного оптического канала. Такой подход обеспечивает малое влияние внешнего освещения на процесс измерения или контроля.

В рамках доклада уделено внимание системам технического зрения, нацеленным на измерение геометрических параметров в промышленности. К таким системам относится система измерения толщины горячего проката в основе которой лежит метод дифференциальной фазовой триангуляции [2], система измерения деформаций трехмерной поверхности на основе фазовой триангуляции и структурированного освещения [3] и системы измерения геометрических параметров топливных таблеток на основе анализа теневого изображения, получаемого в контровом освещении [10].

Кроме того, рассмотрены системы технического зрения, выполняющие анализ дефектов различных объектов в промышленности: система технического зрения для диагностики качества содержимого многолуночных планшетов в медицине [11] и система контроля внешнего вида топливных таблеток [12].

В докладе представлены современные системы технического зрения, нацеленные на решение различных прикладных задач в промышленных технологиях и научных исследованиях. Будут рассмотрены принципы их работы и особенности практической реализации.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект РНФ 23-29-00194).

Список публикаций:

- [1] Меледин В.Г. // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2014, т.5. №1. – С. 3-12.
- [2] Dvoynishnikov S.V., Meledin V.G. *Optoelectronic / Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, M.Rivas-Lopez, O.Sergiyenko, W.Flores-Fuentes, J. C. Rodríguez-Quíñonez, August 2018, p. 49-78.
- [3] Dvoynishnikov S.V., Kabardin I.K., Meledin V.G. (2020) *Advanced Phase Triangulation Methods for 3D Shape Measurements in Scientific and Industrial Applications*. In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) *Machine Vision and Navigation*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-22587-2\_21.
- [4] Музыка М.Ю. и др. // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2021. №4. С. 187-205.
- [5] Благовещенский И.Г. // *Пищевая промышленность*. 2015. №6. С.9-13
- [6] Двойнишиников С. В. и др. // *Измерительная техника*. 2022. No 6. С. 36–40.
- [7] Зуев В.О., и др. // *ИнтерЭкспо Гео-Сибирь*, т.8, №1, 2022. – С.105-111. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-8-1-105-111
- [8] Аль-Офари А. А. X. X. // *Сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции*, Смоленск, 27 апреля 2020 года. – Смоленск: МНИЦ "НаукоСфера", 2020. – С. 55-59.
- [9] Костин С.В., Шамраев А.А., Якимайнен Д.С. // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 5-2. С. 204-208;
- [10] Двойнишиников С.В. и др. // *Автометрия*, 2022 №1. – С. 40-46. DOI: 10.15372/AUT20220105
- [11] Г. В Бакакин, С. В. Двойнишиников, В. В. Рахманов, В. А. Павлов // *XIX Международный научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 8: Национальная конференция с международным участием «СибОптика-2023. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей»*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 1. С. 167 – 172.
- [12] Бакакин Г.В. и др. // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2022. — №8 (122). — URL: <https://research-journal.org/archive/8-122-2022-august/10.23670/IRJ.2022.122.17> (дата обращения 18.08.2022).

## **Создание энергоэффективных маячков с использованием модуляции LoRa**

**Денисюк Максим Игоревич**

*ДВФУ, Институт наукоёмких технологий и передовых материалов (школа)*

*департамент общей экспериментальной физики*

*Полянский Дмитрий Александрович, к.ф.-м.н.*

*[maksim.denisyuk.02@mail.ru](mailto:maksim.denisyuk.02@mail.ru)*

Концепция нашей работы состоит в создании нового поколения лавинных маячков с использованием сигналов с модуляцией LoRa, для использования их в горных районах, где часто происходят несчастные случаи, связанные со сходом лавин.

LoRa (Long Range) - технология беспроводной связи, разработанная компанией Semtech, которая использует радиочастотный спектр, позволяющий передавать данные на большие расстояния с низким энергопотреблением.

Преимущества и особенности модуляции LoRa:

- Большая дальность передачи радиосигнала по сравнению с другими беспроводными технологиями, достигает 10-20 км.

- Пропускная способность 0,3-50 кб/с.

- Низкое энергопотребление, благодаря минимальным затратам энергии на передачу небольшого пакета данных. Для повышения энергоэффективности можно использовать солнечные панели.

- Высокая проникающая способность радиосигнала в городской застройке при использовании частот субгигагерцового диапазона.

- Высокая масштабируемость сети на больших территориях.

- Отсутствие необходимости получения частотного разрешения и платы за радиочастотный спектр, вследствие использования нелицензируемых частот (ISM band).

В России есть лицензированная частота для LoRa – 868 МГц.

Маячок будет иметь возможность работать в двух режимах: ожидание и поиск, также иметь уникальный номер, который будет вводиться в программу. В случае чрезвычайных ситуаций оставшиеся на поверхности участники группы переводят свои маячки в режим поиска и начинают пинговать с брелком засыпанного человека, получая от него обратный сигнал как в случае с автомобильными сигнализациями. В дальнейшем в меню производится настройка на конкретный брелок человека и производится проверка расстояния на него по времени отправки пинга. Такая методика будет, намного эффективнее использоваться с лавинными щупами, или полностью заменять их.

Работа засыпанного брелка в режиме ожидания будет давать понять засыпанному человеку, что с ним пингуются, его ищут, тем самым оказывая ему моральную поддержку.

На сегодняшний день LoRa позволяет передавать речь, тем самым можно будет передавать речь между засыпанными людьми и людьми сверху. Дальность действия модуляции LoRa зависит от нескольких факторов, включая мощность излучателя. Мощность излучения определяется выходной мощностью передатчика и может быть настроена на разные уровни.

"Чипсы" в модуляции LoRa относятся к сигналу, который используется для кодирования данных. Чипс - элементарный периодический сигнал, используемый для представления битов данных.

В модуляции LoRa сигнал разделяется на несколько чипсов, каждый из которых может представлять один или несколько битов информации. Использование широких полос пропускания и чипсов позволяет модуляции LoRa достигать дальних расстояний и обеспечивать хорошую устойчивость к помехам.

Модуляцию LoRa можно использовать для передачи голосовых сообщений, но это потребует дополнительной обработки и кодирования данных перед передачей и декодирования после получения. Например, голосовой сигнал может быть сжат и преобразован в цифровой формат, который затем может быть разделен на пакеты и передан через модуляцию LoRa. При получении пакеты могут быть собраны и декодированы обратно в голосовой сигнал. Однако для передачи голосовых сообщений с использованием LoRa обычно используются более высокие уровни протоколов и стеки, такие как VoIP (голос по протоколу IP) или аудио-кодеки, которые могут обеспечить сжатие, передачу и декодирование голосовых данных с учетом специфических требований для голосовой связи.

Список публикаций:

[1] N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM), O. Hersent (Actility), LoRaWAN™ Specification, 2015. 82с. URL: [https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015\\_-\\_lorawan\\_specification\\_1r0\\_611\\_1.pdf](https://loro-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/2015_-_lorawan_specification_1r0_611_1.pdf)

[2] Коллектив iTechInfo. Технология LoRaWAN. 2020. 100с. URL: <https://itechinfo.ru/node/46>

[3] С. Джоффе, Какие факторы влияют на диапазон LoRaWAN. 2021. 70с. URL: <https://www.mokolora.com/ru/factors-affecting-the-lorawan-range/>

## **Влияние взаимного расположения оптических элементов на погрешность измерений метода фазовой триангуляции**

**Зуев Владислав Олегович**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

*Двойнишников Сергей Владимирович, д.т.н.*

*[vlad.zuev.0017@mail.ru](mailto:vlad.zuev.0017@mail.ru)*

Возможность применения в оптических средах с неоднородными свойствами фазовой триангуляции для контроля трехмерной геометрии объекта является одним из главных конкурентных преимуществ данного измерительного метода и объясняет его широкое применение и существенное развитие [1]. Необходимость технологии высокоточного скоростного неразрушающего контроля геометрических параметров объекта в

оптически неоднородных средах в задачах ветроэнергетики [2], гидроэнергетики [3], авиации определяет перспективность дальнейшего развития метода фазовой триангуляции для улучшения его метрологических характеристик в терминах точности и скорости.

На текущий момент разработаны программные методы оптимизации частоты фазовой модуляции и внутренних параметров оптических элементов [4]: экспозиции, усиления, яркости, контраста, что позволяет адаптировать систему измерения трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции к светорассеивающим свойствам объекта и текущим внешним условиям освещения и в результате минимизировать погрешность измерений. При этом проблема поиска оптимального взаимного расположения оптических элементов: источника и приемника излучения решена не полностью. С одной стороны, согласно теоретическим оценкам [5] с ростом угла триангуляции  $\theta$  уменьшается погрешность восстановления трехмерных координат:

$$\Delta z = \frac{\Delta l p}{2\pi l \sqrt{N} t g \theta}, \quad (1),$$

где  $p$  – период пространственной модуляции,  $\frac{\Delta l}{l}$  – относительная погрешность фотоприемника,  $N$  – количество фазовых изображений. С другой стороны, в реальных условиях источник и приемник излучения зачастую жестко закреплены на едином основании, что определяет необходимость для увеличения угла триангуляции удалять оптические элементы вдоль основания друг относительно друга, что приводит к увеличению расстояния до объекта и как следствие может вызывать ухудшение резкости изображения и отношения сигнал/шум.

Целью данной работы является исследование влияния взаимного расположения источника и приемника оптического излучения на погрешность измерений трехмерной геометрии объекта методом фазовой триангуляции. Для достижения поставленной цели проведена серия экспериментов, в процессе которой источник излучения был жестко закреплен на основании и направлен перпендикулярно в центр объекта, а фотоприемник удалялся вдоль основания, приводя к увеличению угла триангуляции. Основание параллельно объекту и удалено на 70 см. В качестве источника и приемника излучения использовались проектор TouYinGer Q10 FullHD 1080p и камера Imaging Source DMx 72BUC02 с объективом Imaging Source TCL 5026 5MP, соответственно. В качестве измерительного объекта использовалась плоская мишень. Количество периодов модулирующей синусоиды на проецируемом структурированном изображении установлено 50. На каждой итерации эксперимента изображения камеры и проектора поддерживались в фокусе и центрировались по измерительному объекту. Для каждого угла триангуляции производились калибровка измерительной системы в измерительном объеме глубиной 10 мм и последующее измерение трехмерной геометрии плоской мишени в центре измерительного объема. Оценка погрешности измерений производилась путем расчета амплитуды высокочастотной компоненты z-координаты измеренного набора трехмерных точек.

В результате исследована зависимость погрешности измерения метода фазовой триангуляции в диапазоне углов триангуляции: 23.2° - 64.7°, что соответствует диапазону расстояний между источником и приемником излучения 30 – 148 см. Для исключения влияния пространственного разрешения на погрешность измерений количество пикселей проектора в расчете на пиксель фотоприемника поддерживалось близким к постоянному на протяжении эксперимента путем итеративного изменения положения трансфокатора фотоприемника. Из-за ограниченного диапазона трансфокатора и необходимости поддержания постоянного пространственного разрешения эксперимент был разбит на 2 части и выполнен независимо для диапазонов углов триангуляции [23.2°; 48.8°] и [48.8°; 64.7°]. В обоих случаях показано снижение погрешности восстановления трехмерных координат с ростом угла триангуляции: в 2.17 и 1.67 раз, соответственно. При этом в диапазоне углов триангуляции 48.8° - 64.7° наблюдался заметный рост погрешности восстановления кодирующего сигнала ~ 1.6 раз, что может объясняться ухудшением отношения сигнал/шум. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в представленной конфигурации измерительной системы несмотря на рост отношения сигнал/шум и как следствие увеличение погрешности восстановления кодирующего сигнала с ростом угла триангуляции погрешность измерения трехмерной геометрии методом фазовой триангуляции значительно снижается.

Список публикаций:

- [1] Зуев В.О. и др. // *Теплофизика и аэромеханика*. 2023. № 1. С. 127-132.
- [2] Kabardin I.K. et al. // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2023. Т. 32. №. 1. С. 54-61.
- [3] Dvoynishnikov S.V. et al. // *Machine Vision and Navigation*. 2020. P. 675-709.
- [4] Зуев В.О. и др. // *Сб. мат. Межд. науч. конф. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2023»*. 2023. Т. 8. №. 1. С. 211-217.
- [5] Двоинишиников С.В. *Многopараметрическая триангуляция геометрии динамичных объектов в фазово-неоднородных средах: дисс. ... доктора техн. наук: 05.13.18. - ИАиЭ СО РАН. - Новосибирск. 2016. 399 с. С. 5-58.*

## Методика расчёта положения магнитной оси квадрупольных магнитов при измерениях методом вибрирующей струны

*Николайчук Илья Юрьевич*

*Объединённый институт ядерных исследований*

*Костромин Сергей Александрович, д.ф.-м.н.*

*[nikolajchuk@jinr.ru](mailto:nikolajchuk@jinr.ru)*

Одной из основных систем ускорительного комплекса является магнитная система. Качество магнитного поля в каждом структурном элементе должно удовлетворять жёстким требованиям. Основой магнитной системы синхротрона являются дипольные и квадрупольные магниты, предназначенные для управления орбитой пучка и фокусировки пучка. Положение магнитной оси является важным параметром квадрупольного магнита. В случае отклонения траектории пучка от магнитной оси квадрупольного магнита возникают эффекты, негативно влияющие на параметры пучка. Для их минимизации необходима точная юстировка квадрупольных магнитов относительно орбиты.

Задача определения положения магнитной оси заключается в измерении взаиморасположения реперных точек магнита, задающих систему координат магнита, и магнитной оси. Для нахождения положения магнитной оси используется методика вибрирующей струны. Она заключается в регистрации механических колебаний натянутой струны, вызываемых силой Лоренца, создаваемой переменным током в струне и постоянным магнитным полем измеряемого магнита. Радиально-азимутальное положение струны изменяется системой перемещения. Критерием приближения струны к магнитной оси служит уменьшение амплитуды колебаний.

После выставления струны в магнитную ось необходимо определить её положение в системе координат магнита. Данная процедура проводится с использованием координатно-измерительной машины. Положение струны определяется по реперным точкам, расположенным с двух концов на узлах поддержки струны. Расстояния между реперными точками и струной (оффсеты) фиксированы и определены заранее.

В горизонтальной плоскости струна представляет собой прямую и для определения её пространственного положения достаточно двух имеющихся реперных точек. Однако, в вертикальной плоскости струна провисает под действием гравитации (рис. 1). Её форма аналитически описывается уравнением цепной линии:

$$y(x) = a \cdot \cosh\left(\frac{x+c_1}{a}\right) + c_2, \quad (1)$$

где  $a = \frac{T}{q \cdot g}$ ,  $c_1$  и  $c_2$  – свободные параметры,  $T$  – проекция силы натяжения на продольную ось,  $q$  – вес единицы длины струны,  $g$  – ускорение свободного падения. Поскольку величина провисания струны много меньше её длины, проекцию силы натяжения на ось  $x$  можно принять равной общей силе натяжения, что позволяет численно рассчитать параметр  $a$ .

Натяжение струны можно поддерживать различными способами, в том числе без непосредственного измерения его величины. В таком случае, при расчёте коэффициента  $a$  можно выразить силу натяжения как  $T = 4 \cdot f^2 \cdot L^2 \cdot q$ . Тогда  $a = \frac{4 \cdot f^2 \cdot L^2}{g}$ , где  $f$  – резонансная частота на первой гармонике,  $L$  – длина струны. Длину струны можно определить в линейном приближении, исходя из координат крайних точек.

Аналитическое описание формы провисающей струны также можно вывести из дифференциального уравнения движения струны:

$$q \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \alpha \cdot \frac{\partial y}{\partial t} - T \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -qg. \quad (2)$$

Исключив члены, не зависящие от времени и дважды проинтегрировав по  $x$  получим уравнение формы провисающей струны в параболическом виде:

$$y(x) = c_0 \cdot x^2 + c_1 \cdot x + c_2, \quad (3)$$

где  $c_0 = \frac{q \cdot g}{2 \cdot T} = \frac{g}{8 \cdot f^2 \cdot L^2}$ ,  $c_1$  и  $c_2$  – свободные параметры.

Типичные величины провисания струны при измерениях положения магнитной оси лежат в пределах 0,1-0,2 мм. В данном пределе параболическая модель сходится с цепной линией с точностью лучше  $10^{-9}$  мм (см. рис. 1). Таким образом, оба метода определения формы струны в вертикальной плоскости являются применимыми для вибрационной струнной методики.

После составления уравнения, необходимо определить свободные параметры. Для этого решается система уравнений, составленная по координатам двух измеренных точек с учётом оффсетов. Зная длину магнита и получив уравнение, описывающее положение струны в вертикальной плоскости, определяются

координаты струны в центре магнита и на его краях. После этого в линейном приближении рассчитываются угловые положения струны в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

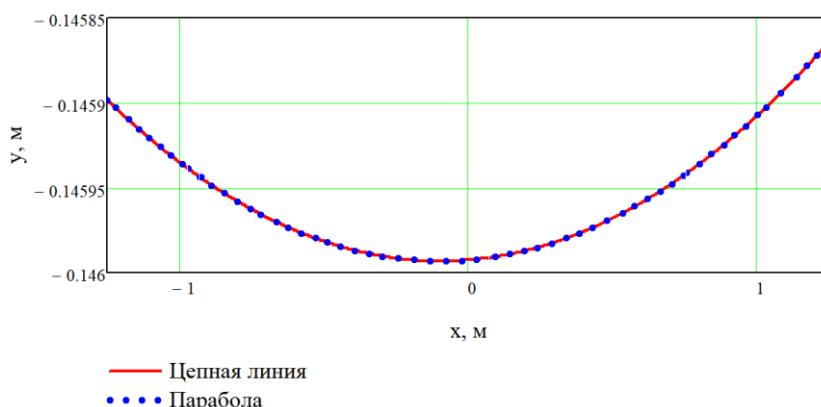


рис.1. Результат сравнения моделей цепной линии и параболы для экспериментальных данных

Координаты магнитной оси в центре магнита и два угловых положения дают исчерпывающую информацию о пространственном положении магнитной оси. Полученные данные используются для юстировки квадрупольных магнитов в тоннеле ускорителя.

## **Методы анализа видеопотока с использованием ML и нейронных сетей для физического анализа руды и минералов**

*Пархоменко Марк Сергеевич*

*Абросимов Алексей Олегович, Мицук Максим Евгеньевич, Грищенко Сергей Дмитриевич,  
Чаплигин Юрий Дмитриевич, Джафарова Улькер Сафар кызы*

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

*Лобода Юлия Олеговна, к.п.н.*

*[Parkhom1358@yandex.ru](mailto:Parkhom1358@yandex.ru)*

Актуальность данной работы заключается в необходимости анализа видеопотока поступающей руды и выявления недобимых материалов для последующей остановки движения конвейера и сигнализации персоналу. Данная система предназначена для повышения надежности и уменьшения вероятности вывода оборудования из строя.

Целью работы является поиск аномальных зон с использованием анализа видеопотока методами машинного обучения и нейронных сетей на конвейер транспортирующем руду.

Система видеоаналитики должна решать задачи: обнаружение инородных тел в руде на конвейерных лентах линий; классификация недобимых тел потенциально ведущих к простоям при попадании в оборудование; остановка конвейерной ленты в случае обнаружения инородных тел; сигнализация оператора в случае обнаружения инородных тел; архивирование данных по инородным телам в виде банка скриншотов с указанием даты и времени фиксации.

Для того чтобы обеспечить непрерывное движение руды и дальнейшего ее анализа используется модель конвейера. Работу модели обеспечивает мотор 28BYJ-48 в количестве двух штук. В качестве груза конструкции будет выступать руда. Над конвейером расположена видеокамера, фиксирующая объекты, расположенные на ленте. Полученная информация обрабатывается программно (записывается в БД).

В связи с потребностью постоянного обращения к видеоматериалам для искусственного интеллекта, было решено систематизировать и автоматизировать процесс хранения и изменения видеоданных. Тем самым будет использоваться база данных, однако в связи с низкой производительностью любых баз данных при хранении файлов больших размеров, стало очевидным решение хранения в базе данных не самого файла, а абсолютного пути до него, что позволит обеспечить быстрый доступ к любому видеофайлу внутри локальной сети. Также основными полями будут: уникальный идентификатор; уникальное имя файла; дата и время записи видео; дата добавления видео в базу; имя пользователя, добавившего видео в базу. В качестве оптимального варианта в качестве инструмента управления базой данных выбрана программа MySQL[1]. Это популярная система, на которой работают многие веб-приложения, динамические веб-сайты и встроенные системы.

Создание в данной системе нового проекта базы данных с нуля занимает меньше времени, легко настроить как отдельный продукт или объединить его с другими технологиями веб-разработки.

Классификационная модель основывается на создании классификаций в машинном обучении, то есть основной является задача отнесения объекта по совокупности его характеристик к одному из заранее известных классов. Существует несколько типов классификаций моделей машинного обучения: метод k-ближайших соседей, классификатор дерева решений, наивный байесовский классификатор, деревья принятия решений и случайные леса, логистическая регрессия. В данном проекте можно использовать байесовский классификатор. Такой классификатор вычисляет вероятность принадлежности объекта к какому-то классу. Эта вероятность вычисляется из шанса, что какое-то событие произойдет, с опорой на уже произошедшие события. К плюсам модели можно отнести постоянное обучение с последующим увеличением точности. Но такую модель нельзя использовать без должной подготовки на производстве, где изначально важна точность.

Регрессионный анализ использует выбранный метод оценки, зависимую переменную и одну или несколько независимых переменных для создания уравнения, которое оценивает значения зависимой переменной. Подробнее модели машинного обучения рассмотрены в [2].

Для достижения цели данной работы используется язык Python по причине его простоты и наличия большого числа библиотек, которые позволяют работать с нейронными сетями, например, TensorFlow, Keras и PyTorch. TensorFlow – это открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов, достигая качества человеческого восприятия. Применяется как для исследований, так и для разработки собственных продуктов Google. Основной API для работы с библиотекой реализован для Python. TensorFlow может работать на многих параллельных процессорах, как CPU, так и GPU, опираясь на архитектуру CUDA для поддержки вычислений общего назначения на графических процессорах. Данная библиотека доступна для 64-разрядных Linux, macOS, Windows, и для мобильных вычислительных платформ, включая Android и iOS.

Таким образом, для достижения цели данной работы потребуется разработать модель ленточного конвейера, который двигает руду в поле зрения камеры, фиксирующая состояние руды. Необходимо создать базу данных, хранящую видеоматериалы для разработки и тренировки нейронной сети, которая отличит руду от не дробимых материалов.

Список публикаций:

[1] Басов А.С. // *Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ»*. 2020. №7 (28) Т.4. С.50-54.

[2] *Основные модели машинного обучения (MLM)* // *Электронный ресурс*: <https://practicum.yandex.ru/blog/modeli-mashinnogo-obucheniya/>

## **Алгоритм решения обратной задачи теплопроводности для уточнения теплофизических свойств неметаллических материалов**

***Петухова Виктория Васильевна***

*Огородников Игорь Николаевич*

*Уральский федеральный университет*

*Огородников Игорь Николаевич, д.ф.-м.н.*

*[petukhova.viktoria@bk.ru](mailto:petukhova.viktoria@bk.ru)*

Компьютерное моделирование высокотемпературных процессов основано на численном решении нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности, коэффициентами которого являются теплофизические свойства материалов в виде табличных функций температуры [1]. На основании вычисленных температурных полей далее выполняются прогнозы служебных характеристик, дефектов, тепловых деформаций. Большой интерес представляют компьютерные модели процессов, в которых происходит изменение свойств вследствие внешних воздействий на материалы, например, химических реагентов, сильных магнитных полей или нейтронного облучения. Во многих таких случаях прямые измерения свойств становятся невозможными. Тогда уточнение компьютерных моделей по теплофизическим свойствам можно осуществить решением коэффициентной обратной задачи теплопроводности [2].

В данной работе рассмотрен процесс затвердевания алюминиевого сплава АК7ч в цилиндрической песчаной форме, изготовленной с помощью 3D-печати. Компьютерное моделирование технологии литья выполнено на конечно-разностной сетке в программной среде LVMFlow (г. Ижевск) решением прямой задачи теплопроводности. Теплофизические свойства песчаной смеси, используемой в аддитивной технологии

изготовления технологической оснастки, неизвестны и быстро меняются после приготовления, поэтому требуют уточнения [3].

В основу алгоритма решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности положен метод Левенберга-Марквардта, активно используемый в глубоком обучении нейронных сетей. Преимуществом выбранного метода является возможность использования в сложных геометрических моделях, поскольку метод не обращается явно к пространственным координатам при составлении матрицы Якоби. Такой алгоритм можно использовать для моделирования технологий изготовления крупногабаритных отливок ответственного назначения.

Разработанный алгоритм реализован в виде программного модуля с использованием свободного программного обеспечения Scilab. Эффективность алгоритма подтверждена на тестовом расчете, в котором в качестве пробной кривой выбрана табличная функция теплопроводности песчаной смеси из базы данных материалов LVMFlow. Пробная кривая назначена в верифицирующих расчетах квази-экспериментальной зависимости свойства. Исходные свойства теплопроводности для алгоритма назначены константой в крайних точках температурного интервала. В результате выполненных расчетов алгоритм сместил расчетную кривую к квази-экспериментальной за 3 итерации с существенным понижением коэффициента качества, отражающего близость расчетной кривой к квази-экспериментальной.

Список публикаций:

[1] Петухова В. В., Огородников А. И. // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2023. № 6 (362). С.52-60.

[2] Огородников И. Н. *Обратные задачи физической диагностики. Модельные задачи в SciLab & Maxima* / Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2023. 152 с.

[2] Петухова В. В., Огородникова О. М. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2024. Т. 90. № 1. С. 42–49.

## **Аппаратно-программный комплекс для диагностики работы системы EFI**

***Полянский Дмитрий Александрович***

***Пащенко Михаил Сергеевич***

***Дальневосточный федеральный университет***

***[polyanskiy.da@dvfu.ru](mailto:polyanskiy.da@dvfu.ru)***

В настоящее время основная масса бензиновых автомобилей оснащена двигателями с системой впрыска топлива с электронным управлением (EFI), которая разделяется на три основные подсистемы: система подачи топлива, система всасывания воздуха и электронная система управления. Подачей топлива в цилиндры управляет электронный управляющий блок (ECU) на основе показаний системы датчиков. Диагностика этой системы с целью выявления неисправностей и оптимизации работы двигателя обычно осуществляется в автосервисах с помощью специальных сканеров, но обычно в неподвижных машинах, а для получения полноценных данных необходимо проверять работу системы датчиков на ходу в разных режимах работы двигателя. Существует альтернативное решение этой проблемы – сборка диагностической системы в составе ноутбука с установленной на нём диагностической программой ECU-EXPLORER и USB K-LINE адаптера, подключаемого через диагностический разъём OBD к ECU. Данная программа имеет широкие возможности, в частности отслеживать показания датчиков в реальном времени и записывать блоки этих данных за нужный период времени (логи). В описаниях работ с программой, которые нам встречались, упоминались только про процедуры снятия логов неисправностей. Так же попадались сообщения, в которых упоминалось отсутствие неисправностей согласно записанным логам, так же ошибок не показывали и тесты дилерским сканером в автосервисе, но при этом наблюдались признаки некорректной работы электроники. Поэтому нами был применён новый метод анализа работы электроники с помощью данной программы - снятие показаний в разных режимах работы двигателя, конвертация полученных данных в MS Excel, построение и анализ графиков.

В работе было проведено тестирование автомобиля SUBARU LEGASY LANCASTER с двигателем EJ254. Причиной постановки эксперимента была нестабильная работа двигателя в поле прогрева до рабочих температур в режиме холостого хода при положении селектора «P» или «N». Снятие логов неисправностей и проверка сканером в автосервисе не выявили ошибок. Поэтому решено было применить сравнительный анализ работы электроники в разных режимах работы двигателя в движении и на месте. Анализ временных зависимостей параметров показал, что после остановки и перевода селектора в положение «N» возникают пилообразные колебания (начиная с временной отметки 17000 на *рис.1*), причем это начинается когда напряжение с датчика потока воздуха падает ниже 1,5 В. Поле этого начинается волноподобное колебание его параметров, приводящее в открытию клапана холостого хода, с последующим набором оборотов. На



следующем шаге напряжение с датчика потока воздуха падает, что приводит к закрыванию клапана холостого хода и падению оборотов, иногда до остановки двигателя. После замены данного датчика проблема была решена.

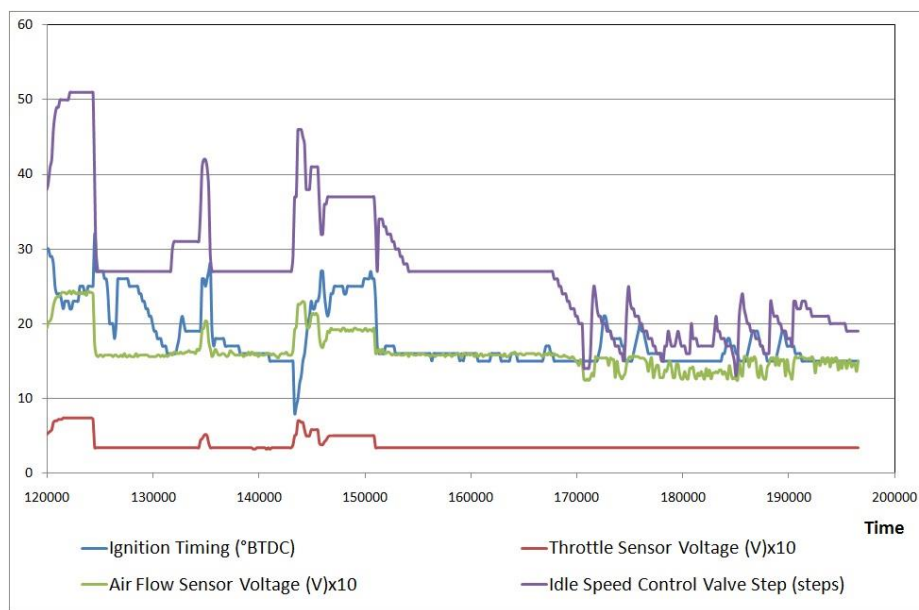


рис.1. Временная зависимость для параметров, влияющих на обороты

## Технические каналы утечки информации, возникающие при ограничении контролируемой зоны

*Полянский Дмитрий Александрович*

*Яценко Алексей Андреевич, Литовский Алексей Витальевич*

*Дальневосточный федеральный университет*

*[polyanskiy.da@dvfu.ru](mailto:polyanskiy.da@dvfu.ru)*

Контролируемая зона (КЗ) – это пространство, в котором исключено неконтролируемое пребывание сотрудников, посторонних лиц, посторонних транспортных, технических и иных материальных средств. КЗ может считаться ограниченной, если за её пределы выходят различные технические средства приёма, обработки и передачи информации (ТСПИ), вспомогательные технические системы и средства (ВТСС), посторонние проводники, побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН), а также конструкции, позволяющие производить съём информации за счёт структурной волны. Дополнительная опасность возникает в случае, если необходимо защищать информацию в съёмном офисе в бизнес-центре. Это предельный случай ограниченной КЗ, так как владельцу информации принадлежат только конечные ТСПИ, а их ПЭМИН распространяются за пределы КЗ, а часть ТСПИ, все ВТСС и посторонние проводники принадлежат владельцу здания и не могут контролироваться, так как проходят через ряд помещений, принадлежащих разным владельцам. В последнем случае ограниченной контролируемой зоны повышенную актуальность имеют такие варианты несанкционированного доступа к информации как высокочастотное навязывание, врезка в витую пару с последующим зеркалированием трафика, прослушивание разговоров через стены выносными микрофонами, перехват ПЭМИН. Наиболее опасным представляется последний вариант, так как он является пассивным методом и не имеет деконспиративных признаков. Из ПЭМИН, создаваемых офисными ТСПИ, наиболее опасными являются излучаемые шлейфами видеointерфейсов, так они переносят информацию, обрабатываемую непосредственно на экране, и в ряде случаев имеют радиус распространения, выходящий за пределы офиса.

С помощью самосборное устройство контроля радиочастотного диапазона в составе SDR–приемника «FOXWEY RTL SDR» (Realtek TL2832u) и логопериодической антенны «RTA–302–20 S» были исследованы 4 распространенные модели моноблоков, широко использующиеся в офисной работе. Для каждого были определены частоты утечки и дальность возможного перехвата. Для Lenovo ThinkCentre Edge 92z это 432,5 МГц, Lenovo S50–30 – 641,5 МГц, HP ProOne 400 – 335,8 МГц, Acer Veriton Z4870G – 519,1. Даже с помощью такого простого оборудование восстановление изображения было возможно на расстоянии до 2 метров.

Еще больше возможностей для перехвата информации по каналу ПЭМИН предоставляет использование ПК и отдельного монитора, подключенного через HDMI. Было показано что в этом случае имеется большой набор потенциально опасных частот (в нашем случае – 13, от 147 до 893 МГц), на которых с разным качеством возможно восстановление изображения. Максимальное расстояние, на котором удалось восстановить изображение - 16 метров в случае двух гипсокартонных стен на металлопрофиле, 7 метров в случае бетонного потолочного перекрытия. Отсюда следует вывод что использование HDMI в случае обработки конфиденциальной информации является наиболее нежелательным.

Также были исследованы три ноутбука, Acer Aspire E5-575 Series, Lenovo Sunrise 125, Huawei Nbl-WAP9R. Для первого диапазон излучаемых частот был в пределах 790-3945 МГц, для второго 44,5-130,2 МГц. Дальность распространения не превышала метра. Алюминиевый корпус ноутбука Huawei не позволил обнаружить ПЭМИН видеointерфейса.



рис.1. Восстановление изображения подключённой по HDMI палении LG через гипсокартонную стену

## Разработка устройства для оценки теплопроводности

*Сенкевич Ксения Сергеевна*

*Петрозаводский государственный университет*

*Логинов Дмитрий Владимирович*

*[ksusha.senkevich@yandex.ru](mailto:ksusha.senkevich@yandex.ru)*

В настоящее время на рынке представлено огромное количество теплопроводящих составов, наиболее распространённые теплопроводящие пасты. Основное назначение их — это повышение эффективности отвода тепла путем уменьшения термического сопротивления между двумя поверхностями, граничащими друг с другом.

Область применения термопаст – компьютеры, электроника, теплоэнергетика и прочие сферы, где требуется эффективное охлаждение или отвод тепла от деталей устройств. Чаще всего термопасты применяются для компонентов компьютера, которые выделяют тепло. Они позволяют эффективно и быстро отводить тепло от нагретых компонентов, тем самым способствуя более стабильной работе устройств и предотвращению перегрева.

К теплопроводным пастам выдвигается большое количество требований, таких как наименьшее тепловое сопротивление, сохранение свойств в радиусе рабочих температур, но не всегда заявленные свойства соответствуют действительности. Подбор нужного состава и характеристик термопасты может занять много времени и нанести ущерб устройству из-за незнания как точно себя поведет теплопроводная паста.

Условно, термопасты можно разделить на категории: жидкометаллические и термопасты на кремнийорганической основе. Последние делятся на группы по наполнителям: с металлическим, с керамическим и с углеродным.

Основным критерием классификации термопаст является их теплопроводность. Теплопроводность – это физическая величина, которая характеризуется способностью материала переносить энергию от более нагретых частей к менее нагретым.

Для поиска наиболее подходящего термоинтерфейса для компонентов какого-либо аппарата или прибора предлагается использовать устройство для оценки теплопроводности, где в качестве измерительной аппаратуры выступает датчик температуры и Wi-Fi модуль для передачи данных на ПК, а в качестве ПО – разработанное программное обеспечение, обрабатывающее поступающие данные на устройство и выводящее графический результат.

В данной работе собрано устройство на базе контроллера ESP8266. Со следующими вспомогательными компонентами: датчики температуры DS1820 и два нагревательных элемента. Принцип работы установки заключается в следующем. Между двумя элементами нагрева наносится термопаста, на один элемент подается ток, вследствие чего он нагревается и с помощью двух градусников, подключенных к контроллеру, записывается температура нагрева. В это же время через другие два градусника записываются показания температур с нагревательного элемента, на который ток не подавался. На основе полученных данных на компьютере строится зависимость температуры второго элемента от времени нагрева первого элемента. Данный опыт позволяет определить пригодность исследуемой термопасты.

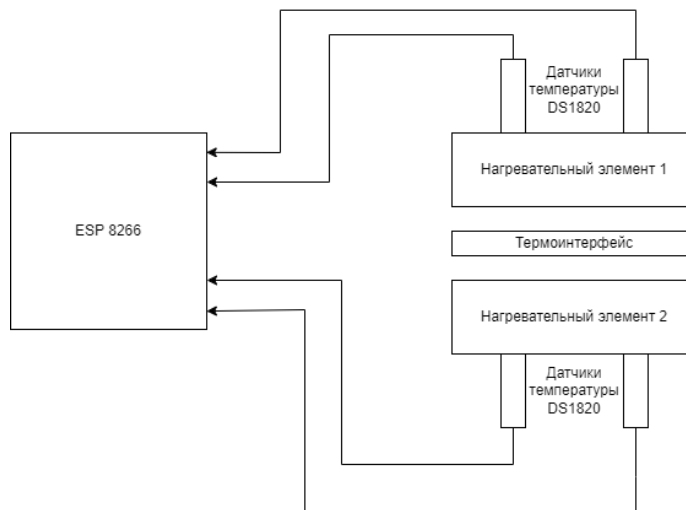


рис.1. Концептуальная схема устройства

## Система анализа температуры в помещении литейного цеха

*Степаненков Антон Сергеевич*

*Петрозаводский государственный университет*

*Логинов Дмитрий Владимирович*

*[anton.stepanenkov123@gmail.com](mailto:anton.stepanenkov123@gmail.com)*

Система анализа температуры в помещении литейного цеха имеет ключевое значение для обеспечения оптимальных условий работы оборудования. Основным назначением является предупреждение резких скачков температуры и отслеживание понижения температуры до критической отметки.

Нарушение температурного режима в цеху может произойти из-за ряда причин: выход из строя системы контроля температуры, а именно отказ системы нагрева или охлаждения; внешний фактор, влияющий на изменение температуры микроклимата цеха.

Контролировать температуру в цеху необходимо по следующим соображениям: температура оказывает влияние на свойства расплавленного металла, поддержание оптимальной температуры позволяет сохранить качество материала и избежать дефектов при отливке; правильно подобранная температура обеспечивает эффективность литейного процесса, сокращая время на охлаждение и застывание металла; оптимальный диапазон температур позволит уменьшить расходы на отопление или охлаждение цеха.

Для поддержания температуры в цеху предлагается использовать систему анализа температуры. При понижении температуры может происходить быстрое остывание заготовки. Из-за того, что температура резко понижается, возможно растрескивание и появление микротрещин на металле. Данная система поможет избежать быстрого остывания заготовок.

Принцип работы системы заключается в следующем. В цеху предусматривается установка большого количества датчиков DS18B20, предназначенных для отслеживания температуры. Контроль показаний осуществляется в режиме реального времени с помощью контроллера ESP8266 со встроенным Wi-Fi модулем. Информация с данного контроллера передается в базу данных, хранимую на сервере, с периодичностью в одну минуту. Web-сервис с помощью запросов к полученной базе данных получает необходимую информацию, обрабатывает её, создавая и заполняя таблицы, и создает 3D-модель с возможностью вращения и отображением градиента температур. С помощью использования Web-сервиса существует возможность предоставить

пользователю максимальную мобильность. Он не привязан к конкретному устройству, а может использовать и получать информацию с данной системы вне зависимости от текущего местоположения. Обработка информации происходит на стороне Web-сервиса, поэтому пользователь не обязан обладать мощным устройством для построения 3D-модели помещения с последующим анализом.

Таким образом осуществляется контроль данных о температуре в помещении цеха, что позволяет вовремя выявлять нарушения в техническом процессе. Благодаря частому обновлению информации в базе данных и на Web-сервисе существует возможность вовремя отследить нежелательные изменения температур, а также определить возможное местоположение дефекта.



рис.1. Концептуальная схема системы анализа температуры

В результате данная система представляет собой современный подход к мониторингу и контролю температуры в промышленных помещениях. Установка датчиков DS18B20 и использование контроллера ESP8266 обеспечивают отслеживание показателей в режиме реального времени, что позволяет оперативно реагировать на любые отклонения. Передача данных в базу данных и построение графической 3D-модели градиента температур демонстрируют высокую точность и детализацию отслеживаемой информации. В целом, эта система эффективно помогает выявлять и решать проблемы связанные с температурным режимом помещения, обеспечивая более надежную и безопасную работу в литейном цеху.

## Методы предварительной обработки изображений для повышения качества регистрации в системах компьютерного зрения

*Шалеев Артем Викторович*

*Институт оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева СО РАН*

*Елизаров Алексей Игоревич, к.т.н.*

*[artem.shaleev@mail.ru](mailto:artem.shaleev@mail.ru)*

В настоящее время не существует таких систем регистрации изображений, которые обеспечивали бы идеальное качество. Поэтому важным этапом в задачах компьютерного зрения и разработке систем анализа изображений является предварительная обработка. Методы предварительной обработки находят широкое применение во многих областях жизни. К ним относят различного рода техники, направленные на преобразование изображения в формат, удобный для дальнейшего анализа. Они могут включать в себя такие операции как, фильтрацию шумов, повышение контраста и выравнивание освещенности. Это могут быть как «стандартные» методы коррекции по конкретным параметрам, так и преобразования, радикально изменяющие изображения.

Одним из способов предварительной обработки, улучшающих качество изображений, являются методы и алгоритмы основанные на анализе гистограммы. Наиболее распространённые задачи, решаемые с помощью этих методов, это пороговая обработка, коррекция яркости и контраста, эквализация, оценка экспозиции, сегментация изображений. Методы обработки, при этом, могут быть как локальными, так и глобальными. Глобальные оценивают все изображение сразу, а локальные предполагают разбиение изображения на отдельные фрагменты (блоки), для каждого из которых строится и обрабатывается своя гистограмма. Несмотря на свою простоту и эффективность гистограммные методы обработки обладают рядом недостатков, такими как потеря информации, появление артефактов, влияние на цветовую информацию. Различные методы анализа гистограмм могут привести к различным, не всегда положительным результатам, и выбор определенного метода может зависеть от конкретных требований задачи.

В рамках решения задачи проанализированы и протестированы различные методы выравнивания гистограмм: глобальная, локальная, адаптивная и адаптивная с ограничением контраста. Последний является улучшенной версией алгоритма эквализации и позволяет корректировать контраст и освещенность без изменения структуры изображения. Суть метода заключается в разбиении изображения на группу блоков, для каждого из которых строится своя гистограмма, к которой уже применяется операция адаптивной эквализации. Гистограмма вычисляется как набор интервалов для каждого блока. Значения интервала гистограммы,

превышающие предел обрезки, накапливаются и распределяются по другим интервалам. Последним этапом выполняется процедура интерполяции значений пикселей на стыке разделенных блоков.

Одним из главных преимуществ такого подхода является возможность контролировать увеличение контраста на изображении и адаптивность к локальным особенностям изображения. К недостаткам такого подхода можно отнести увеличение вычислительной сложности, по сравнению с классическими алгоритмами эквализации. Кроме этого, в некоторых случаях алгоритм может привести к появлению артефактов, в областях перехода между высококонтрастными и низкоконтрастными областями изображения. Пример обработки изображения клеток с помощью метода адаптивной эквализации с ограничением контраста представлен на (рис. 1), параметры определены на основе значения критерия качества BRISQUE.

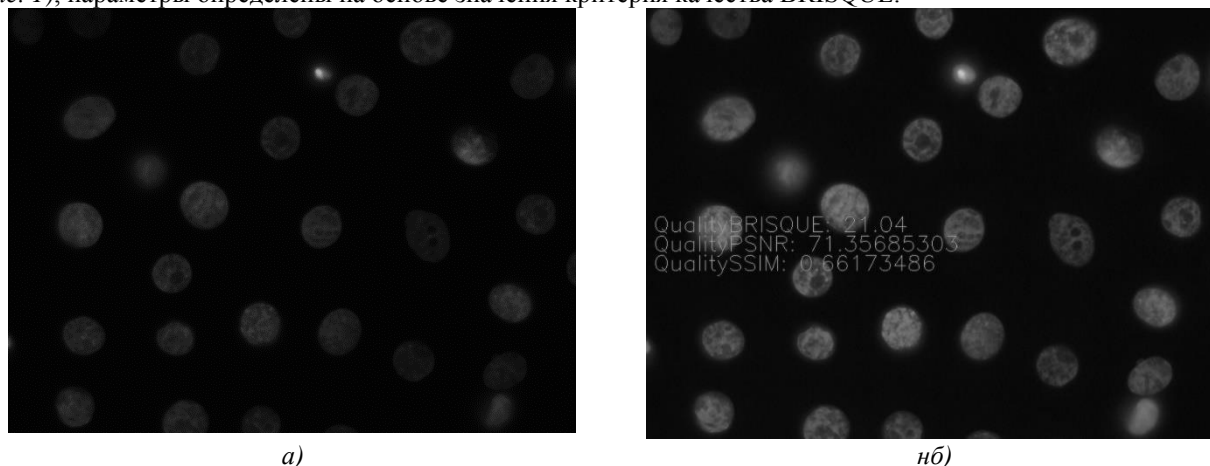


рис. 1 Некоторые результаты обработки изображения алгоритмом адаптивной эквализации, где (а)-оригинальное изображение, (б)-обработанное

Некорректный выбор параметров алгоритма может привести к отрицательным результатам, таким как излишняя коррекция контраста или увеличение шума на изображении. Для устранения этого недостатка предлагается модифицировать алгоритм, путем добавления блока определения качества преобразованного изображения, позволяющего итеративно подбирать параметры алгоритма эквализации [1-3].

Список публикаций:

- [1] Galileiskii V.P., Elizarov A.I. Kokarev D.V., Matvienko G.G., Morozov A.M. Image quality measures // Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2019. doi:10.1117/12.2539911.
- [2] Anish M., Moorthy A. K., Bovik A. C. No-reference image quality assessment in the spatial domain // IEEE Transactions on Image Processing. 2012. P. 4695–4708. doi: 10.1109/tip.2012.2214050
- [3] Ma J., Fan X., Yang S.X., Zhang X., Zhu X. Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization Based Fusion for Underwater Image Enhancement // Preprints. 2017. doi:10.20944/preprints201703.0086.v1

## Разработка программного обеспечения детектора SciCode

**Ярцева Мария Андреевна**

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирский государственный университет*

*Глушак Анастасия Андреевна*

[m.yartseva@g.nsu.ru](mailto:m.yartseva@g.nsu.ru)

Детектор SciCode является многоканальным координатным рентгеновским детектором, работающим в счётном режиме, т. е. регистрирующим срабатывание от каждого попавшего в детектор фотона с энергиями выше установленного порогового значения. Данный детектор предназначен для проведения исследований дифракционных экспериментов на пучке СИ. Такие исследования будут проводиться секцией «Динамические процессы» на станции 1-3 «Быстропротекающие процессы» строящегося ЦКП «СКИФ». Обеспечением работы этой станции занимается в том числе ИЯФ СО РАН, разрабатывая архитектуру подобных детекторов, а также их аппаратное и программное обеспечение.

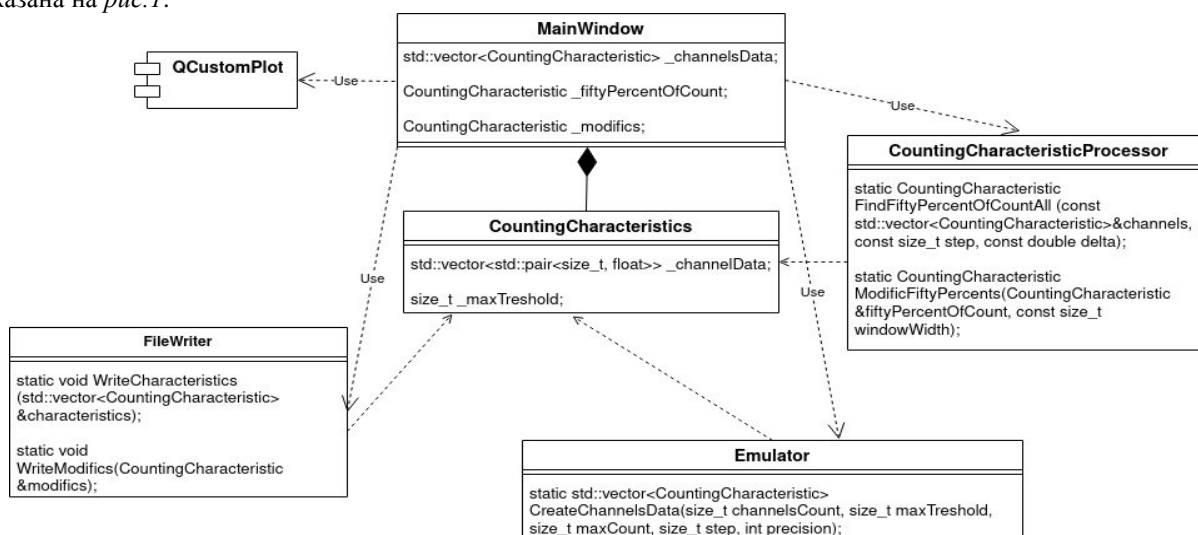
Регистрирующим элементом детектора SciCode является микрополосковый сенсор, каждая полоска которого подключена к регистрирующему каналу специализированных интегральных микросхем (ASIC), расположенных на платах регистрации. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), стоящие на платах регистрации, задают общие для всех каналов пороги срабатывания компараторов (глобальные пороги). Индивидуальная подстройка каждого канала осуществляется с помощью внутренних ЦАП (индивидуальные

пороги). Съём и обработка данных, а также управление работой микросхем, осуществляется с помощью программируемой логической интегральной микросхемы (ПЛИС), расположенной на управляющей плате. Передача данных на компьютер пользователя осуществляется через Ethernet-интерфейс. Представление и обработка данных проводится с помощью программного обеспечения [1].

Целью работы является разработка программного обеспечения счётного рентгеновского координатного детектора SciCode. Основными функциями ПО являются управление работой детектора, обработка пакетов, полученных с детектора, и визуализация экспериментальных данных. Важным преимуществом программного обеспечения является независимость от операционной системы компьютера. ПО разрабатывается на языке программирования QT5 (C++), среда разработки — Qt Creator [2].

Для калибровки детектора в его программное обеспечение добавлен алгоритм подстройки счёта в электронных каналах. Для этого алгоритм обрабатывает счетные характеристики — зависимость счёта фотонов от порога соответствующего компаратора, расположенного на плате регистрации. По этой характеристике можно оценить параметры детектора, такие как шумовая характеристика и энергетический диапазон. Пятьдесят процентов счёта счетной характеристики позволяют оценить среднее значение сигнала на входе канала регистрации, тем самым оценить энергию фотонов, попавших в детектор. Выравнивание счёта в каналах осуществляется подстройкой значений 50% счёта в каналах путем вычисления порогового значения для внутренних ЦАП.

К настоящему времени реализован алгоритм подстройки индивидуальных порогов каждого регистрирующего канала; создан эмулятор экспериментальных данных для отладки и тестирования работы приложения, поскольку платы находятся на этапе монтажа и реальные экспериментальные данные отсутствуют. Прототип интерфейса обладает функциями эмулирования счётных характеристик, отрисовки их графиков, нахождения 50% счёта каждого канала; расчёт поправок индивидуальных порогов, а также сохранение полученных результатов. Архитектура внутреннего устройства приложения на текущий момент показана на *рис. 1*.



*рис. 1. UML-диаграмма внутренней архитектуры*

Сейчас ведется работа над добавлением функционала управления детектором: управление глобальными порогами и установка индивидуальных порогов; добавлением функции отображения поканального распределения счёта фотонов. Дальнейшим развитием приложения является написание взаимодействия аппаратного и программного обеспечения, реализация сетевого взаимодействия по протоколу UDP для передачи данных через Ethernet.

Список публикаций:

- [1] V.M. Aulchenko, A. A. Glushak, V. V. Zhulanov, L. I. Shekhtman, V. M. Titov, “Development of One-Coordinate Detector for Diffraction Experiments at a Synchrotron Radiation Beam” *Proceedings of the 2023 IEEE 24 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). Russia, Altai, 29 June – 3 July 2023. Piscataway: IEEE, 2023. P. 710-713. DOI:10.1109/EDM58354.2023.10225204.*
- [2] Lee Zhi Eng “Hands-On GUI Programming with C++ and Qt5”, Packt Publishing, 2018, pp. 89-114.



## 19 - Теплофизика и теплотехника. Процессы тепломассобмена

Гареев Тимур Ильясович, 5 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Получение композитов титан-графен и олово-графен методом магнетронного распыления**

Смовж Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н.

e-mail: [t.gareev@g.nsu.ru](mailto:t.gareev@g.nsu.ru)

стр. 324

Деринг Екатерина Даниловна, магистрант 1 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Метод определения поступательной температуры частиц сверхзвукового газового потока по поперечному распределению приведенной плотности в молекулярном пучке**

Кирилл Алексеевич Дубровин

e-mail: [e.dering@g.nsu.ru](mailto:e.dering@g.nsu.ru)

стр. 325

Зайцев Олег Валерьевич, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Синтез тонких титаносодержащих плёнок методом магнетронного напыления с дополнительным анодом**

Сахапов Салават Зинфирович, к.ф.-м.н.

e-mail: [o.zaitsev@g.nsu.ru](mailto:o.zaitsev@g.nsu.ru)

стр. 327

Каргина Анастасия Максимовна, 2 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Влияние электрического поля на поведение капли наножидкости диоксида титана, полученной методом наносекундной импульсной лазерной абляции**

Старинский Сергей Викторович, д.ф.-м.н.

e-mail: [a.kargina@g.nsu.ru](mailto:a.kargina@g.nsu.ru)

стр. 328

Скорюпин Александр Игоревич, 2 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Численное исследование эффекта резкого увеличения обратного потока при сверхзвуковом истечении газа из двух соосных кольцевых сопел в камеру низкого давления**

Морозов Алексей Анатольевич, д.ф.-м.н.

e-mail: [a.skoryupin@g.nsu.ru](mailto:a.skoryupin@g.nsu.ru)

стр. 329

Тинтулова Мария Вячеславовна, магистрант 1 года обучения

Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет

**Экспериментальное исследование структуры вихревого течения в газовихревом биореакторе с плавающей шайбой**

Наумов Игорь Владимирович, д.т.н.

e-mail: [m.tintulova@g.nsu.ru](mailto:m.tintulova@g.nsu.ru)

стр. 330

Хайрулин Андрей Рашидович, аспирант 3 года обучения

Новосибирск, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

**Термические свойства сплава LiK3Pb4 в жидком состоянии**

Станкус Сергей Всеволодович, д.ф.-м.н.

e-mail: [rainjke95@yandex.ru](mailto:rainjke95@yandex.ru)

стр. 332

Чемичев Даниил Геннадьевич, 4 курс

Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, факультет летательных аппаратов

**Исследование переходных режимов теплообмена при кипении HFE-7100 от тонких слоев к большому объёму**

Жуков Владимир Иванович, к.т.н.

e-mail: [danchemichev@yandex.ru](mailto:danchemichev@yandex.ru)

стр. 333



## Получение композитов титан-графен и олово-графен методом магнетронного распыления

Гареев Тимур Ильясович

Новосибирский государственный университет, Институт теплофизики СО РАН

Смоуж Дмитрий Владимирович, д.ф.-м.н.

[t.gareev@g.nsu.ru](mailto:t.gareev@g.nsu.ru)

Значительный интерес представляет изучение наноструктур различной размерности, поскольку наноразмерные материалы проявляют свойства, отличительные от свойств макроскопических аналогов. В последнее время активно исследуются материалы, созданные на основе структур различной размерности, а также способы их получения. Подобные материалы обладают свойствами, определяемыми выбранными структурами, а их применение возможно в различных устройствах, таких как накопители [1], газовые и биосенсоры [2], электрокатализаторы [3], солнечные батареи [4]. Уникальность графена в применениях заключается в его свойствах – низком уровне флуктуаций сигнала и малым сопротивлением [5]. Оксиды титана и олова активно используются в сенсорных устройствах, чем и обусловлена актуальность изучения нанокompозитов с ними. Согласно некоторым работам, получение наночастиц возможно методом магнетронного распыления. Размер частиц и свойства покрытий зависят от параметров формирования: длительности синтеза, давления рабочего газа, мощности и типа источника. Предпочтительным выбором схемы питания системы является высокомощный импульсный источник, поскольку позволяет варьировать размер частиц, не изменяя мощности [6] в отличие от источника постоянного тока (DC).

Работа посвящена исследованию процесса получения наночастиц титана и олова на графене методом магнетронного распыления. Графен был получен методом CVD на медной пластине и переносился на подложки оксида кремния и Si. Для синтеза частиц на графене был использован HiPIMS (высокомощное импульсное магнетронное распыление). Схема напыления представлена на рис.1. В камере с магнетроном 1, предварительно откачанной до давления  $10^{-4}$  Па, пробивается и поддерживается разряд между мишенью-катодом 2 и анодом 3 при рабочем давлении. Среднее отрицательное смещение на катоде составляло около 500 В. Анод, стенки камеры и подложкодержатель 4 заземлены. Рабочий газ (Ar) 5 ионизуется и выбивает целевое вещество из мишени. Частицы 6 распыляются и летят в сторону подложки 7 с графеном 8. Для определения сопротивления образцов предварительно были нанесены медные контакты 9 на графен. Параметры наночастиц варьировались путем изменения времени напыления (5-30 секунд). Другие параметры синтеза: давление в камере  $p = 0,35$  Па, ток источника  $I = 100$  мА, длительность импульса  $\tau = 30$  мкс, скважность  $\beta = 111$  – не изменялись. Напряжение на мишени и мощность подбирались такими, чтобы поддерживался разряд.

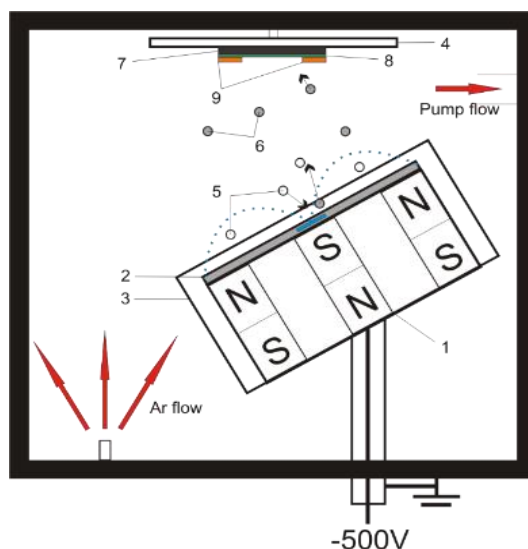


рис.1. Схема напыления металлических наночастиц методом магнетронного распыления

1 – магнетрон, 2 – мишень-катод, 3 – анод, 4 – подложкодержатель, 5 – ионы Ar, 6 – частицы целевого вещества, 7 – подложка Si/SiO<sub>2</sub>, 8 – графен, 9 – медные контакты

Синий пунктир – линии магнитной индукции магнитной системы магнетрона

По результатам серии экспериментов были получены композиты титан-графен и олово-графен при разном времени синтеза. Было определено сопротивление образцов. Так, для композитов титан-графен для времени синтеза 5 секунд относительное уменьшение сопротивления составило 4,5%. Для 10 и 30 секунд синтеза относительное увеличение сопротивления составило 18% и 7% соответственно. Для олова относительное изменение сопротивления для образцов составило 46%, 75% и 53% для времен 5, 10 и 30 секунд.

Увеличение сопротивления, вероятно, связано с деформацией и повреждением графена. Фоточувствительность композитов проявляется только на образцах, полученных на кремниевой подложке. Вероятной причиной отсутствия эффекта на образцах на оксиде кремния является способность электронов переходить из подложки в графен. Значения относительного фотоиндуцированного уменьшения сопротивления для Ti-G равны 3%, 12% и 31%. В результате проделанной работы апробирован режим напыления наночастиц на графен, позволяющий получать фоточувствительные композиты.

Список публикаций:

- [1] Li X., Wang J. *One-dimensional and two-dimensional synergized nanostructures for high-performing energy storage and conversion* //InfoMat. – 2020. – Т. 2. – №. 1. – С. 3-32.
- [2] Sharma A., Tomar M., Gupta V. *WO<sub>3</sub> nanoclusters–SnO<sub>2</sub> film gas sensor heterostructure with enhanced response for NO<sub>2</sub>* //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – Т. 176. – С. 675-684.
- [3] Chen S. et al. *Design of a graphene nitrene two-dimensional catalyst heterostructure providing a well-defined site accommodating one to three metals, with application to CO<sub>2</sub> reduction electrocatalysis for the two-metal case* //The Journal of Physical Chemistry Letters. – 2020. – Т. 11. – №. 7. – С. 2541-2549.
- [4] Low F. W. et al. *Enhance of TiO<sub>2</sub> dopants incorporated reduced graphene oxide via RF magnetron sputtering for efficient dye-sensitized solar cells* //Rare Metals. – 2018. – Т. 37. – №. 11. – С. 919-928.
- [5] Neto A. H. C. et al. *The electronic properties of graphene* //Reviews of modern physics. – 2009. – Т. 81. – №. 1. – С. 109.
- [6] Pilch I. et al. *The use of highly ionized pulsed plasmas for the synthesis of advanced thin films and nanoparticles* //KONA Powder and Particle Journal. – 2014. – Т. 31. – С. 171-180.

## Метод определения поступательной температуры частиц сверхзвукового газового потока по поперечному распределению приведенной плотности в молекулярном пучке

*Деринг Екатерина Даниловна*

*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет*

*Зарвин Александр Евгеньевич, к.ф.-м.н., Дубровин Кирилл Алексеевич*

*[e.dering@g.nsu.ru](mailto:e.dering@g.nsu.ru)*

Исследование сверхзвуковых кластированных потоков в настоящее время является одной из актуальных задач динамики разреженных газов. Во-первых, Ван-дер-Ваальсовы кластеры нашли широкий спектр различных практических применений [1]: модификация различных поверхностей и их химических свойств, сверхгладкая полировка и имплантация легирующих примесей на небольшую глубину и т.д. Во-вторых, фундаментальное изучение кластированных потоков интересно с точки зрения физической природы газовых кластеров, что может помочь расширить существующую область прикладных применений.

Кластер представляет собой систему нескольких связанных слабыми силами частиц, рассматриваемую как промежуточное состояние между изолированными одиночными частицами и конденсированным веществом в объемной фазе. Несмотря на детальное изучение кластированных струй с середины прошлого столетия [2-3], до сих пор остаются неизученными вопросы излучения, ионизации, фрагментации кластеров, их взаимодействия с атомами или молекулами фонового пространства (в том числе рассеяния) и др. В том числе остается открытым вопрос влияния процесса конденсации на параметры сверхзвукового потока.

Известно, что развитие конденсации в потоке приводит к искажению изоэнтропичности течения, к наблюдаемому экспериментально уширению протока [4] и формированию так называемого “кластерного следа” [5] (рис. 1б). Одним из факторов, предположительно оказывающих влияние на данный процесс, является выделение в поток скрытой теплоты конденсации. Для детального изучения этого эффекта необходимо иметь достоверные экспериментальные методы, позволяющие определять температуру в сверхзвуковом неравновесном потоке. В данной работе проведена адаптация и верификация метода определения поступательной температуры частиц, основанная на регистрации поперечных профилей плотности молекулярного пучка, на универсальном экспериментальном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета [6].

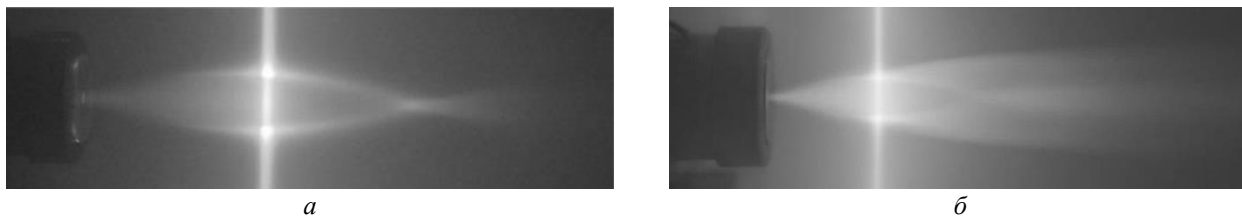


рис.1. Визуализация сверхзвуковой струи аргона, истекающей из сверхзвукового сопла в условиях пренебрежимо малой (а) и развитой (б) конденсации в потоке.

Молекулярный пучок представляет собой поток частиц, не взаимодействующих ни друг с другом, ни с частицами фонового окружения. Для формирования молекулярного пучка традиционно используется метод, предложенный в 1951 году А. Канторовичем и Д. Греем [7]: на оси потока устанавливается конусообразная диафрагма (скиммер) с малым диаметром входного отверстия. При условии свободномолекулярного истечения газа за скиммером, в гиперзвуковом приближении, можно показать, что нормированная на максимум плотность пучка  $\bar{n}_b$  зависит от угла  $\theta$  между осью молекулярно-пучковой системы и детектором как:

$$\bar{n}_b(\theta) = \frac{1}{t^5} \frac{2S_{\parallel}^2 + t^2}{2S_{\parallel}^2 + 1} e^{\left(\frac{S_{\parallel}^2}{t^2} - S_{\parallel}^2\right)}, \text{ где } t = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \frac{S_{\parallel}^2}{S_{\perp}^2}}, \quad (1)$$

где  $S$  – скоростное отношение (отношение направленной скорости потока  $W$  к наиболее вероятной тепловой скорости частиц,  $S_{\perp} = \frac{W}{\sqrt{2kT_{\perp}/m}}$ ), а  $T_{\perp}$  и  $T_{\parallel}$  – поперечная и продольная поступательная температура соответственно. В условиях равновесия по поступательным степеням свободы ( $T_{\perp} = T_{\parallel}$ ), если угол  $\theta$  мал, то соотношение (1) можно упростить до формулы, легко применимой для расчета перпендикулярной поступательной температуры из полученных экспериментально поперечных профилей плотности молекулярного пучка (рис. 2):

$$S_{\perp}^2 = \frac{1}{t g^2 \theta} \ln \frac{1}{\bar{n}(\theta)}. \quad (2)$$

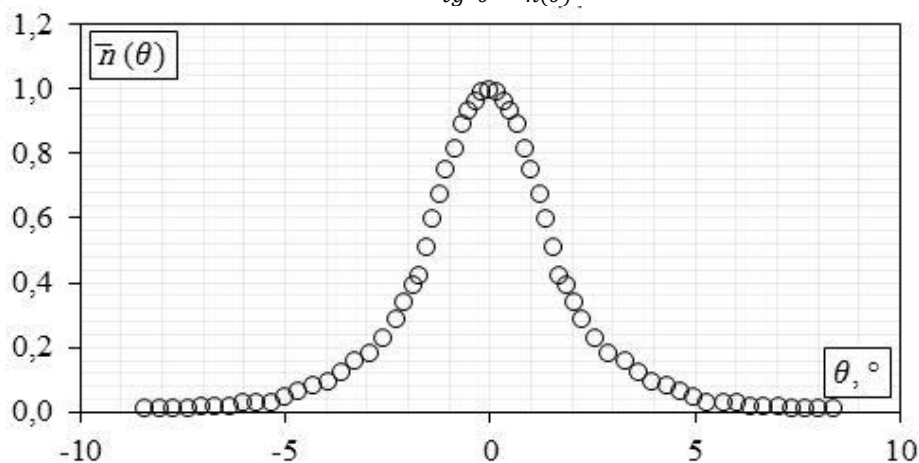


рис.2. Поперечный профиль приведенной плотности частиц в молекулярном пучке, сформированного из осевой области сверхзвукового неконденсирующегося потока гелия.

В данной работе представлено детальное теоретическое обоснование описанного экспериментального метода. Показано, что результаты, полученные в неконденсирующихся потоках, хорошо согласуются с известными литературными данными. Кроме того, в докладе представлены первые результаты, полученные в сверхзвуковых кластированных струях аргона.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант FSUS-2020-0039).

Список публикаций:

- [1] Ieshkin A. E. et al. // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2022. V. 192. №. 7. P. 722-753..
- [2] Hagena O.F. // *The Physics of Fluids*. 1974. V. 17. №. 5. P. 894-896
- [3] Buck U., Krohne R. // *The Journal of chemical physics*. 1996. V. 105. №. 13. P. 5408-5415.
- [4] Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. *Газодинамика процессов истечения*. Новосибирск: Наука, 1984, 235 с.
- [5] Dubrovin K. A. et al. // *Vacuum*. 2023. V. 218. P. 112652.
- [6] Zarvin A. E. et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. V. 45. №. 5. P. 819-827.
- [7] Kantrowitz A., Grey J. // *Review of Scientific Instruments*. 1951. V. 22. №. 5. P. 328-332

## Синтез тонких титаносодержащих плёнок методом магнетронного напыления с дополнительным анодом

Зайцев Олег Валерьевич

Новосибирский государственный университет

Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе

Саханов Салават Зинфирович

[o.zaitsev@g.nsu.ru](mailto:o.zaitsev@g.nsu.ru)

Цель данной работы состоит в исследовании влияния малого анода на магнетронный разряд и свойства плёнок нитрида титана, синтезированных методом реактивного магнетронного распыления титановой мишени в атмосфере Ar и N<sub>2</sub>. Плёнки нитрида титана применимы как защитный и декоративный слой для режущих поверхностей и бижутерии, для легирования контактов в интегральных микросхемах [1] и в качестве коллектора заряда в сенсibilизированных красителем солнечных элементах [2]. Малый анод в данной системе является дополнительным источником электронов, что увеличивает ионный ток к подложке, и является одним из ключевых параметров, влияющих на свойства получаемых покрытий [3]. Расширение возможностей управления параметрами напыления является актуальной задачей для исследования.

В работе приведены: схема эксперимента и методы исследования полученных плёнок. Приведены результаты измерений – ВАХ магнетронного разряда в различных режимах. Плёнки проанализированы методами оптической спектроскопии, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, резистометрии.

Экспериментальная установка состоит из вакуумной камеры объёмом 100 литров, оснащённой магнетроном с кольцевым анодом, подложкодержателем, дополнительным малым анодом. Источник питания магнетрона работает в режиме высокоомощной импульсной генерации. На малый анод подавалось положительное, относительно стенок, напряжение. Вакуумная камера оснащена насосной и газовой системой, получение плёнок происходит при давлении в 0,3 Па.

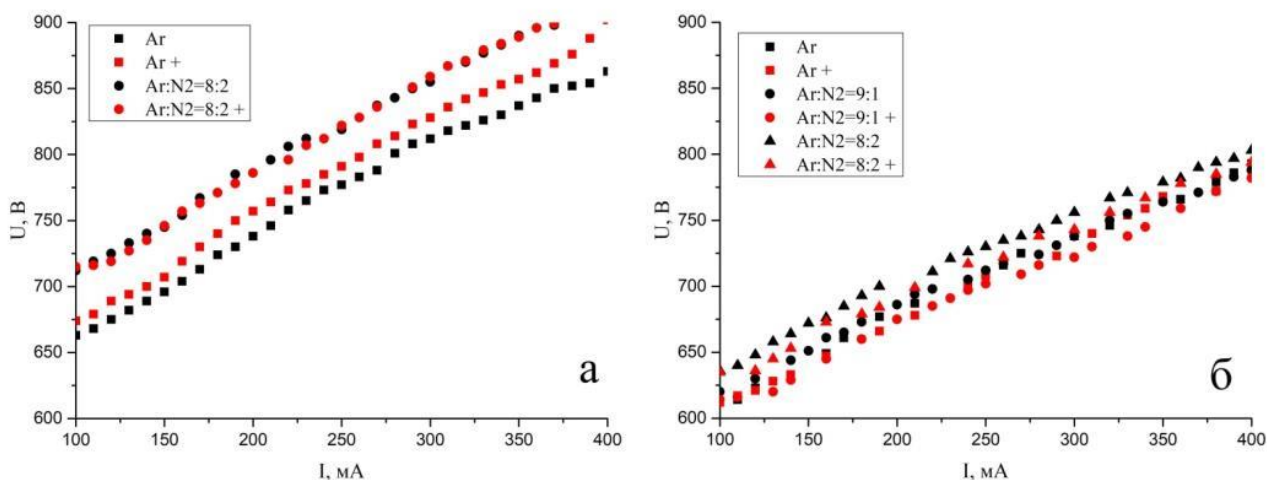


рис. 1. Вольтамперная характеристика магнетрона в режиме импульсного магнетронного распыления в аргоне и смеси аргона и азота при давлениях 0,3 Па (а), 0,4 Па (б). Знаком + отмечены характеристики совместной горения разряда магнетрона и малого электрода при токе 20 мА.

Синтез плёнок происходит в результате распыления верхнего катодного слоя магнетрона в аномальном тлеющем разряде. Распылённые в разряде частицы взаимодействуют с атмосферой камеры и в дальнейшем осаждаются на поверхности подложки. При этом, помимо основного разряда магнетрона, появляется дополнительный разряд малого анода, который повышает степень ионизации разряда, увеличивающий ионный ток к подложке. В предыдущих работах исследовались свойства плазмы, создаваемой тлеющим разрядом одиночного анода и совместного разряда точечного электрода и магнетрона [4-5].

Приведены результаты исследования влияния малого анода на свойства магнетронного разряда и, полученных плёнок TiN, такие как прозрачность, сопротивление и ширина запрещённой зоны. По значениям данных величин были выявлены различия между плёнками, синтезированными с током на аноде от 0 до 20 мА. Ширина запрещённой зоны для плёнок, синтезированных с током анода 0 мА, составила 0,93 эВ и сопротивление 74 Ом/см<sup>2</sup>, а для плёнок, синтезированных с током анода 20 мА, ширина запрещённой зоны составила 0,74 эВ и сопротивление 88 Ом/см<sup>2</sup>. После отжига плёнок в атмосфере воздуха, плёнки,

синтезированные с током 0 мА показали средний коэффициент пропускания 0,732 в диапазоне 390-520 нм, а плёнки, синтезированные с током 20 мА на аноде, показали средний коэффициент пропускания 0,705 в том же диапазоне. Ширина запрещённой зоны для обоих типов плёнок составила 3,22 эВ. После отжига в атмосфере азота ширина запрещённой зоны для обоих типов плёнок составила 2,62 эВ. Данные результаты показывают, что введение дополнительного анода позволяет изменять оптические и электрические свойства тонких плёнок.

Список публикаций:

- [1] M. Tao, D. Udeshi, S. Agarwal, E. Maldonado, W.P. Kirk. Negative Schottky barrier between titanium and n-type Si(001) for low-resistance ohmic contacts // *Solid-State Electronics Volume 48, Issue 2, February 2004, Pages 335-338.*
- [2] Beomjin Yoo, Kang-Jin Kim, Yong Hyun Kim, Kyungkon Kim, Min Jae Ko, Won Mok Kimc, Nam-Gyu Park. Titanium nitride thin film as a novel charge collector in TCO-less dye-sensitized solar cell // *Journal of Materials Chemistry, 2011, 21, 3077–3084*
- [3] J. E. Greene, J.E. Sundgren, L. Hultman, I. Petrov, D. B. Bergstrom. Development of preferred orientation in polycrystalline TiN layers grown by ultrahigh vacuum reactive magnetron sputtering // *Applied Physics Letters 67 (20), 13 November 1995*
- [4] S. Z. Sakhapov, A. V. Fedoseev, G. I. Sukhinin. Influence of magnetron sputtering on composition of spherical gas discharge plasma // *OP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1105 (2018) 012111*
- [5] S. Z. Sakhapov. Parameters of magnetron sputtering gas discharge plasma with a small anode // *Journal of Physics: Conference Series 1382 (2019) 012168*

## Влияние электрического поля на поведение капли наножидкости диоксида титана, полученной методом наносекундной импульсной лазерной абляции

**Каргина Анастасия Максимовна**

*Новосибирский государственный университет*

*Старинский С.В., д.ф.-м.н.*

[Kargina.dr@mail.ru](mailto:Kargina.dr@mail.ru)

Фотокаталитические процессы привлекают все больший интерес. Одним из наиболее широко используемых фотокатализаторов является диоксид титана, что обусловлено его высокой фотокаталитической активностью, химической стабильностью и относительно низкой стоимостью. В настоящее время актуальным направлением исследований является изучение влияния внешнего электрического поля на поведение капель жидкости. Это вызвано тем, что электрические поля способны оказывать существенное воздействие на свойства и поведение жидкостей, включая их поверхностное натяжение, форму, размер, а также на возникновение дополнительных сил внутри капель, включая капиллярные [1]. Таким образом, целью данной работы являлось изучение влияния внешнего электрического поля на поведение коллоидных растворов диоксида титана, синтезированных методом импульсной наносекундной лазерной абляции в жидкости.

Синтез коллоидных растворов диоксида титана осуществлялся методом импульсной наносекундной лазерной абляции (ИЛА) титана в жидкости. Одним из главных преимуществ ИЛА в жидкости является простота создания экспериментальной установки и высокая чистота синтезируемых растворов. Лазерное воздействие осуществлялось основной гармоникой твердотельного Nd:YAG лазера (рис.1).

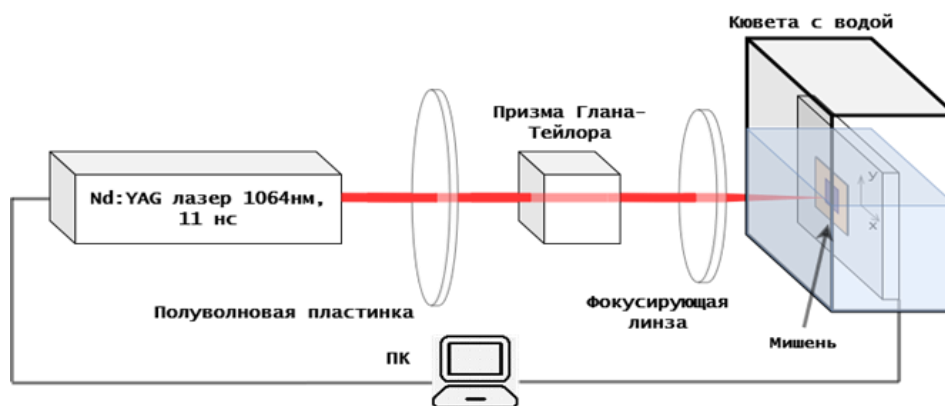


рис.1. Схема экспериментального стенда для синтеза коллоидного раствора

Для исследования поведения капель в электрическом поле был использован экспериментальный стенд, состоящий из обкладок конденсатора, высоковольтного источника постоянного напряжения и высокоскоростной камеры (рис.2). Для фиксации положения капли была использована бифильная поверхность.

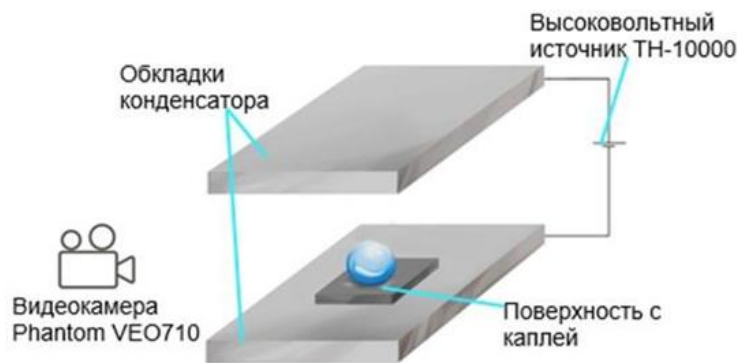


рис.2. Схема экспериментального стенда

Исследовано поведение раствора диоксида титана в электрическом поле. При подачи напряжения на электроды капля вытягивалась вдоль поля, увеличивая вертикальный размер. Это увеличение приведено на рис. 3 в виде отношения изменяющегося  $h$  в зависимости от увеличения напряжения к начальной высоте капли  $h_0$ . При достижении напряжения в 9,5 кВ происходил электрический пробой воздушного промежутка. Определена величина напряженности поля, при которой происходит пробой. Было проведено сопоставление результатов чистой жидкости с коллоидным раствором. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии наночастиц оксида титана на поляризацию капли жидкости.

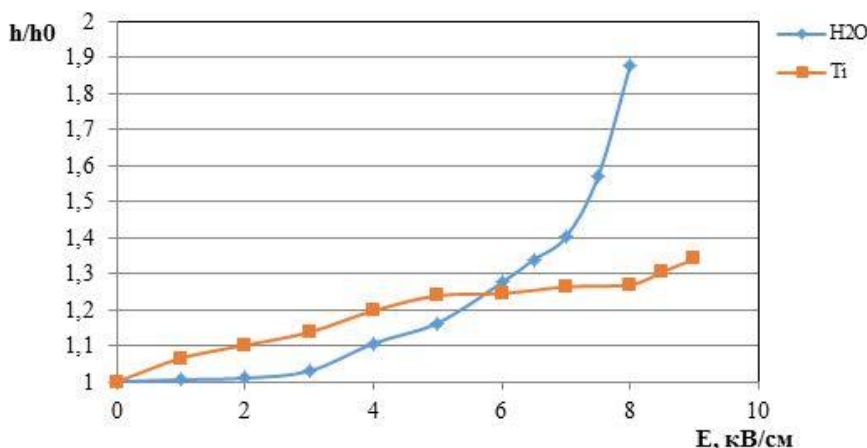


рис.3. Зависимость высоты капли воды и коллоидного раствора диоксид титана от напряженности поля конденсатора

Список публикаций:

[1]. H. Almoammadi, A. Amirfazli, *Sessile drop evaporation under an electric field*, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 555 (2018) 580–585.

### Численное исследование эффекта резкого увеличения обратного потока при сверхзвуковом истечении газа из двух соосных кольцевых сопел в камеру низкого давления

Скорюпин Александр Игоревич

Новосибирский государственный университет

Алексей Анатольевич Морозов, д.ф.-м.н.

[a.skoryupin@g.nsu.ru](mailto:a.skoryupin@g.nsu.ru)

Применение сверхзвуковых течений актуально для различных аэрокосмических приложений и вакуумных технологий. Так в последнее время активно развивается газоструйный плазмохимический метод с использованием электронного пучка, проходящего через осевой канал с откачкой газа [1, 2]. В данном методе подача газа в реактор осуществляется через два соосных кольцевых сопла: через внешнее сопло подается рабочий газ, тогда как через внутреннее сопло подается защитный газ, который обеспечивает защиту осевого канала электронного пучка от действия фонового газа. Оптимизация параметров работы кольцевых сопел



является сложной многопараметрической задачей, актуальной для многих практических приложений. В данной работе исследуется эффект резкого увеличения обратного потока аргона через осевой канал при увеличении расхода через внешнее сопло.

Для расчета сверхзвукового истечения в камеру с низким давлением использовалось решение уравнений сплошной среды в рамках пакета ANSYS Fluent. Рабочий объем задается в виде цилиндра длиной 170 мм и диаметром 40 мм. На одном из торцов расположены два кольцевых сопла с высотой критического сечения 0,1 мм. Соосно соплам расположен обратно направленный осевой канал электронной пушки диаметром 9 мм. Через внутреннее сопло задавался фиксированный расход аргона ( $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Тогда как через внешнее сопло расход варьировался в диапазоне от 0 до  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Рассматривалось два случая: с открытым (рис. 1.) и закрытым (рис. 2.) осевым каналом.

Проведен анализ влияния расхода газа на обратный поток в осевой канал электронной пучка. При заданном фиксированном расходе через внутреннее сопло при изменении расхода через внешнее сопло от 0 до  $15 \text{ м}^3/\text{ч}$  обратный поток является постоянным. При дальнейшем увеличении расхода через внешнее сопло ( $> 15 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) наблюдается резкое увеличение обратного потока (рис. 1). Аналогичный эффект наблюдается при течении с закрытым осевым каналом: при повышении расхода наблюдается резкое увеличение давления в осевом канале электронной пучка (рис. 2).

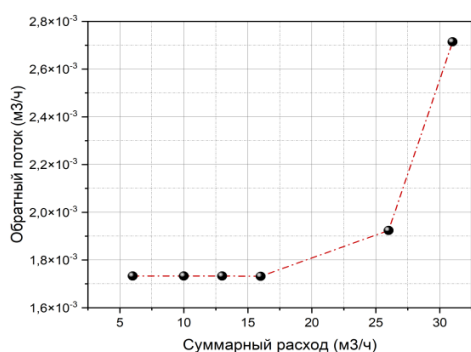


рис. 1. Зависимость обратного потока в осевой канал электронной пушки от суммарного расхода через сопловой блок

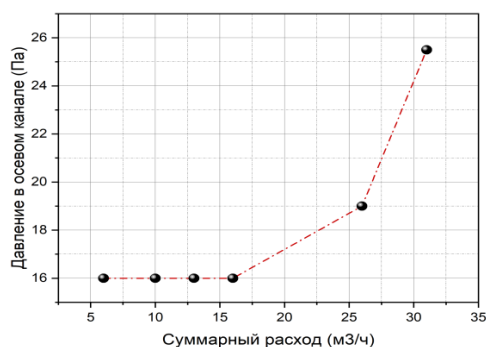


рис. 2. Зависимость давления в осевом канале электронной пушки от суммарного расхода через сопловой блок

Величина обратного потока напрямую влияет на параметры работы электронной пушки. Полученные результаты позволяют проводить исследования эффекта резкого увеличения давления с закрытым осевым каналом, что значительно упрощает задачу.

Список публикаций:

- [1]. Шарафутдинов Р. Г., Сквородко П. А., Шукин В. Г., Константинов В. О. Осаждение пленок кремния с использованием газоструйного плазмохимического метода: эксперимент и газодинамическое моделирование // ПМТФ. 2018. Т. 59, № 5. С. 22 - 30.
- [2]. Шарафутдинов Р. Г., Константинов В. О., Федосеев В. И., Шукин В. Г. Конверсия природного и попутного нефтяного газов в холодной электронно-пучковой плазме // Прикладная физика. 2017. № 2. С. 13 - 18.

## Экспериментальное исследование структуры вихревого течения в газовихревом биореакторе с плавающей шайбой

Тинтулова Мария Вячеславовна

Шарифуллин Булат Руфкатович

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Наумов Игорь Владимирович, д.т.н.

[m.tintulova@g.nsu.ru](mailto:m.tintulova@g.nsu.ru)

Исследование структуры течения в газовихревом биореакторе актуально для развития методов выращивания клеточных культур [1, 2]. Особенно это важно в том случае, когда при росте культуры в биореакторе могут существенно изменяться такие параметры среды как плотность и вязкость культуральной среды, что соответственно приводит к изменению характерных режимов течения. Так как выращиваемая культура в большинстве случаев не прозрачна, определить режим течения визуально невозможно. Возникает

проблема установки оптимальных режимов течения без высокотурбулентных пульсаций и застойных зон. Поэтому детальное исследование закономерностей режимов течения в газовихревом реакторе имеет большой фундаментальный и прикладной интерес.

Экспериментальные исследования вихревого течения проводились в стеклянном универсальном газовихревом биореакторе объемом 8.5 литров, со стабилизирующей движение рабочей жидкости шайбой, свободно плавающей на поверхности рабочей жидкости (рис. 1).

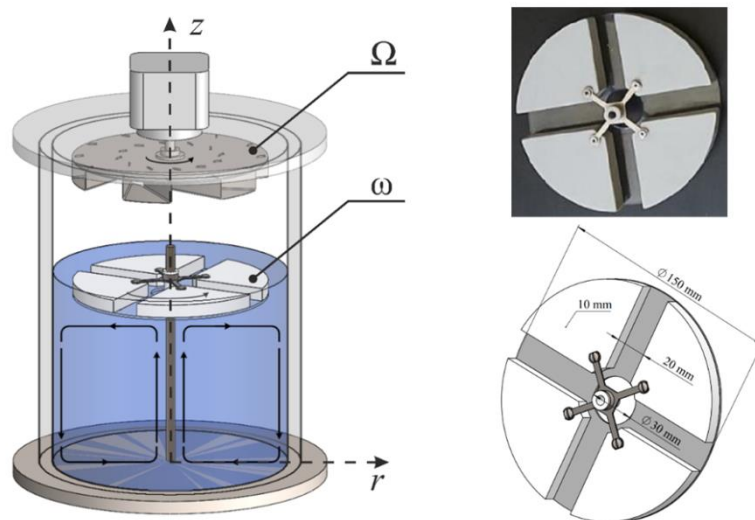


рис.1. Схема газовихревого биореактора в конфигурации с плавающей шайбой (слева), вид сверху и схема плоской шайбы (справа)

В качестве рабочих жидкостей, перекрывающих основные классы культур клеток, тканей и микроорганизмов по параметрам плотности и вязкости, использовались дистиллированная вода и 65% водно-глицериновый раствор. Для наблюдения картины вихревого движения применялся метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Исследования проводились в вертикальном сечении, проходящем через ось реактора, и в горизонтальном сечении под плавающей шайбой и вблизи дна на расстоянии 2 мм.

Были определены закономерности вихревого движения культуральной среды в зависимости от ее объема и интенсивности вращения активатора, генерирующего вихревое движение в воздухе. Воздушный вихрь, генерируемый лопаточным колесом (активатором) над поверхностью жидкости, раскручивает рабочую жидкость со свободно плавающей шайбой. Экспериментально показано, что при вращении активатора под шайбой возникает центробежная меридиональная циркуляция, вблизи оси биореактора формируется восходящая закрученная струя, а при увеличении угловой скорости вращения активатора формируется пузыревидный распад вихря в приосевой области биореактора. На рис. 2 представлены векторные поля скорости в жидкости под шайбой и скалярное поле осевой компоненты скорости, при заполнении реактора водно-глицериновой смесью на 50%.

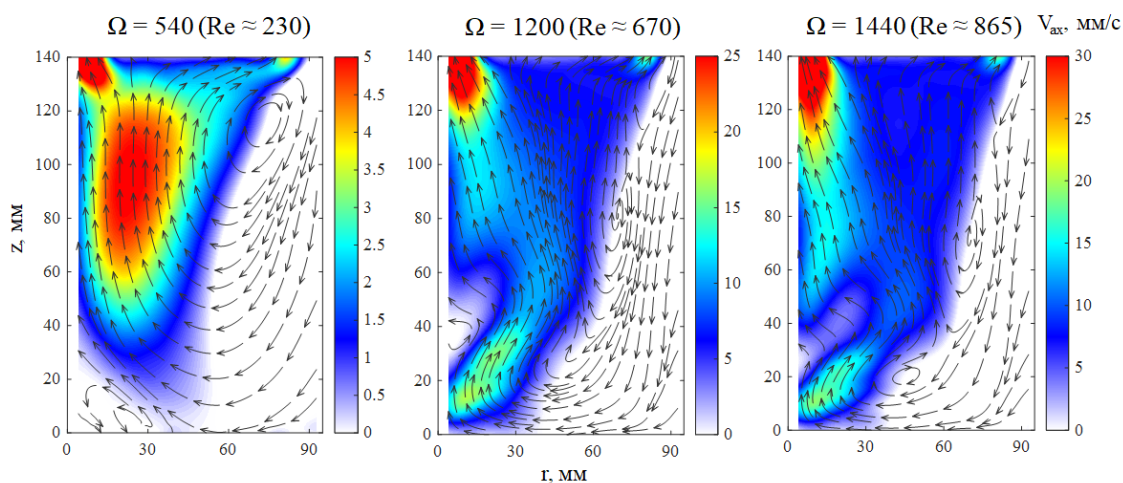


рис.2. Распределение скорости в вертикальном сечении биореактора и эволюция распада вихря при увеличении  $\Omega$



Установлено, что, несмотря сложную конфигурацию стабилизирующего поток устройства – свободно плавающей шайбы, наблюдаемая вихревая структура и ее динамика при увеличении интенсивности закрутки потока совпадает со структурой ограниченного вихревого потока в цилиндрическом контейнере как для одножидкостных, так и несмешиваемых двухжидкостных конфигураций.

Список публикаций:

[1] Мертвцов Н., Рамазанов Ю., Репков А., Дударев А.Н., Кислых В. Газовихревые биореакторы "Биок": Использование в современной биотехнологии // Новосибирск: Новосибирское отделение издательства "Наука" (2002). С.118.

[2] Naumov, I. V., Gevorgiz, R. G., Skripkin, S. G., & Sharifullin, B. R. Experimental investigation of vortex structure formation in a gas-vortex bioreactor // *Thermophysics and Aeromechanics* (2022). 29(5). С.719-724.

## Термические свойства сплава $\text{LiK}_3\text{Pb}_4$ в жидком состоянии

*Хайрулин Андрей Рашидович*

*Агажанов Алибек Шахметович, Хайрулин Рашид Амирович, Станкус Сергей Всеволодович*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

*Станкус Сергей Всеволодович, д.ф.-м.н.*

*[rainjke95@yandex.ru](mailto:rainjke95@yandex.ru)*

Жидкие сплавы щелочных металлов (ЩМ) со свинцом относятся к уникальному классу веществ, так называемых ионных расплавов, в которых помимо металлического типа межатомного взаимодействия в значительной степени проявляется ионная (или ионно-ковалентная) связь [1]. Отличительной особенностью этих расплавов является существенное отклонение концентрационных зависимостей различных структурно-чувствительных свойств от поведения, характерного для типичных жидкометаллических систем [2–4]. Данное явление объясняется тенденцией к формированию в этих расплавах химического ближнего порядка в виде ассоциированных комплексов, в которых оказывается запертой значительная часть валентных электронов. По мнению авторов [1], это обусловлено тем, что разница в электроотрицательности между ЩМ и Pb оказывается достаточной для частичного смещения валентных электронов щелочных металлов к атомам Pb. Предполагается, что в жидких сплавах свинца с легкими щелочными металлами (Li и Na) преобладают «октетные» ионные комплексы вида  $\text{ЩМ}_4^+\text{Pb}^{4-}$ . В жидких сплавах свинца с тяжелыми щелочными металлами (K, Rb и Cs) формируются полианионные тетраэдрические кластеры  $[\text{Pb}]^{4-}$  с общим зарядом  $-4$ , вокруг которых кулоновскими силами удерживаются четыре катиона  $\text{ЩМ}^+$ . Если для бинарных расплавов ЩМ–Pb имеется обширная экспериментальная информация по многим теплофизическим свойствам, то для трёхкомпонентных жидких систем типа А–В–Pb (где А и В – соответственно легкий и тяжелый ЩМ) практически отсутствуют какие-либо сведения. Особый интерес представляет тройная система Li–K–Pb, в которой могут образовываться как октетные комплексы  $\text{Li}_4^+\text{Pb}^{4-}$ , так и полианионные структуры  $\text{K}_4^+[\text{Pb}_4]^{4-}$ . При этом известно, что литий и калий практически нерастворимы друг в друге как в твердом, так и в жидком состояниях (вплоть до 1200 К) [5]. К настоящему моменту экспериментальное изучение тройной системы Li–K–Pb ограничивается структурным исследованием [6] твердого сплава  $\text{LiK}_3\text{Pb}_4$ , который является интерметаллическим соединением.

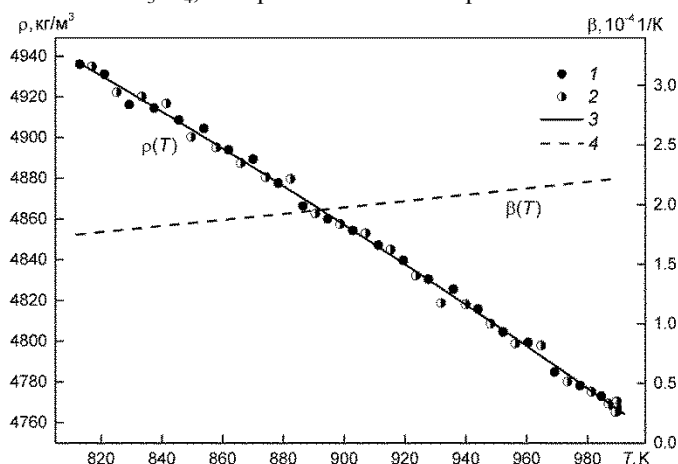


рис.1. Плотность  $\rho$  и объемный коэффициент термического расширения  $\beta$  расплава  $\text{LiK}_3\text{Pb}_4$ .

1, 2 – данные 1-ого и 2-ого измерения  $\rho$ , 3 – аппроксимация  $\rho$ , 4 –  $\beta$ .

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование плотности ( $\rho$ ) и объемного коэффициента термического расширения ( $\beta$ ) сплава  $\text{LiK}_3\text{Pb}_4$  в жидком состоянии. Основные сложности при

работе с расплавами щелочных металлов заключаются в их высокой химической активности и высоком давлении паров. Данные ограничения были успешно преодолены бесконтактным методом просвечивания образцов узким пучком гамма-излучения (гамма-метод [2]) с использованием герметичной измерительной ампулы, заполненной инертным газом. Приготовление сплава  $\text{LiK}_3\text{Pb}_4$  осуществлялось в атмосфере высокочистого аргона (99,999 об.%) внутри перчаточного бокса, оснащенного электронными аналитическими весами, имеющими погрешность 2 мг, и сварочным аппаратом. На рис. 1 представлены результаты по  $\rho$  и  $\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}$ , полученные в интервале от температуры ликвидуса  $T_L = 812$  К до 990 К с общей неопределенностью

0,6–0,8% и 4–7% соответственно. Сканирование пучком гамма-излучения показало, что исследуемый сплав в жидком состоянии является практически однородным по составу. При проведении термического анализа, помимо начала кристаллизации расплава, был обнаружен второй тепловой эффект при температуре  $T_p = 789,0 \pm 1,0$  К, предположительно связанный с перитектической реакцией. Также было обнаружено, что для трёхкомпонентного расплава  $\text{LiK}_3\text{Pb}_4$  наблюдается эффект «химического сжатия» [2]: рассчитанное значение относительного избыточного мольного объема составило –25...–26% в интервале от  $T_L$  до 1000 К. Это косвенно указывает на наличие в исследуемом расплаве химического ближнего упорядочивания, характеризующего уменьшением межатомных расстояний [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10095, <https://rscf.ru/project/23-79-10095/>.

Список публикаций:

- [1] van der Lugt W. // *J. Phys. Condens. Mat.* 1996. Vol. 8. No. 34. P. 6115.
- [2] Хайрулин Р. А., Станкус С. В., Абдуллаев Р. Н. // *Теплофизика и аэромеханика.* 2015. Т. 22. № 3. С. 359.
- [3] Meijer J. A. Geertsma W., van der Lugt W. // *J. Phys. F Met. Phys.* 1985. Vol. 15. No. 4. P. 899.
- [4] Agazhanov A. Sh., Abdullaev R. N., Stankus S. V., Khairulin A. R. // *Phys. Chem. Liq.* 2023. Vol. 61. No. 4. P. 253.
- [5] Хайрулин Р. А., Абдуллаев Р. Н., Станкус С. В. // *Теплофизика и аэромеханика.* 2021. Т. 28. № 1. С. 157.
- [6] Bobev S., Sevov S. C. // *Polyhedron.* 2002. Vol. 21. No. 5–6. P. 641.

## **Исследование переходных режимов теплообмена при кипении HFE-7100 от тонких слоев к большому объёму**

**Чемичев Даниил Геннадьевич**

*Жуков Владимир Иванович, Швецов Дмитрий Анатольевич*

*Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН  
Новосибирский государственный технический университет*

*Жуков Владимир Иванович, к.т.н.*

[danchemichev@yandex.ru](mailto:danchemichev@yandex.ru)

В настоящее время применение иммерсионного охлаждения с помощью диэлектрических жидкостей в сферах электрооборудования, энергетики стало наиболее актуальным. В большинстве работ изучается иммерсионное охлаждение при кипении в большом объеме. Кипение в тонком слое жидкости изучено недостаточно. Изучение характерных переходов от теплообмена при кипении в большом объеме жидкости к теплообмену при кипении в тонких слоях представляет важную задачу для исследований. Тонкие слои позволяют существенно уменьшить массогабаритные характеристики установок, сократить расходы дорогостоящих теплоносителей.

В работе экспериментально исследовался теплообмен и критические тепловые потоки при кипении на гладкой горизонтальной поверхности в широком диапазоне изменения высоты слоя диэлектрической жидкости HFE-7100 и давления.

Исследование было проведено на экспериментальном стенде, детальное описание которого приведено в работе [1]. Плотность теплового потока  $q$  рассчитывалась по уравнению Фурье из температурного градиента, измеренного вдоль центральной вертикальной линии верхней части дна, с использованием линейной аппроксимации выходного сигнала пяти термопар, расположенных на различной высоте в днище рабочей камеры установки. В качестве рабочей жидкости использовался метоксинонафторбутан (HFE-7100)  $\text{C}_4\text{F}_9\text{OCH}_3$ . Эксперименты проводились при высотах слоя (мм): 1.5; 2.5; 6.0; 25. Кривые кипения получены при приведенных давлениях 0.022 (50 кПа); 0.045 (100 кПа); 0.067 (150 кПа). Диапазон изменения плотности теплового потока (0.5–320) кВт/м<sup>2</sup>. Одновременно с измерениями эффективности теплообмена и критического теплового потока проводились визуальные наблюдения и высокоскоростная видеосъемка.

Экспериментальные значения критического теплового потока сравнивались с расчётными значениями по известным моделям кризиса кипения в большом объеме жидкости. Модели гидродинамического кризиса Кутателадзе [2] и модели сухих пятен Ягова [3] соответственно.

$$q_{cr} = 0.16 \cdot h \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot \sqrt[4]{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}_{lg} \quad (1)$$

$$q_{cr} = (q_{cr,l}^3 + q_{cr,h}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$q_{cr,l} = 0.5 \frac{h_{lg}^{81} \cdot \sigma^{95} \cdot \rho_v^{13} \cdot \lambda^{79} \cdot f(Pr) \cdot g^{21/55}}{v^{1/2} \cdot c_p^{3/10} \cdot R_l^{79/110} \cdot T_s^{21/22}}$$

$$f(Pr) = \left( \frac{Pr^{9/8}}{1 + 2 \cdot Pr^{1/4} + 0.6 \cdot Pr^{19/24}} \right)^{4/11}$$

$$q_{cr,h} = 0.06 \cdot h_{lg} \cdot p_v^{0.6} \cdot \sigma^{0.4} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\mu} \right]^{0.2}$$

На рис. 1 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных в слоях жидкости различной высоты при давлениях 100 кПа и 50 кПа, с расчетными зависимостями Кутателадзе (1) и Ягова (2). Из рис. 1(а) видно, что значения критических тепловых потоков, полученные в слоях высотой 10 мм, 16 мм, 25 мм и 35 мм, находятся между расчетных значений по формулам Кутателадзе (1) и Ягова (2). В тонких слоях жидкости высотой 1.5 мм, 2.5 мм и 6.0 мм кризис осушения поверхности возникал до достижения расчетных значений критического теплового потока по формулам Кутателадзе (1) и Ягова (2).

При давлении 50 кПа в тонких слоях жидкости высотой 1.5 мм, 2.5 мм и 6.0 мм кризис осушения поверхности возникал до достижения расчетных значений критического теплового потока по формулам Кутателадзе (1) и Ягова (2) (см. рис. 1(б)). Значения критических тепловых потоков, полученные в слоях жидкости высотой 10 мм, 16 мм, 25 мм и 35 мм, находятся между расчетных значений по формулам Кутателадзе (1) и Ягова (2). Наиболее высокое значение критического теплового потока было получено в слое высотой 16 мм.

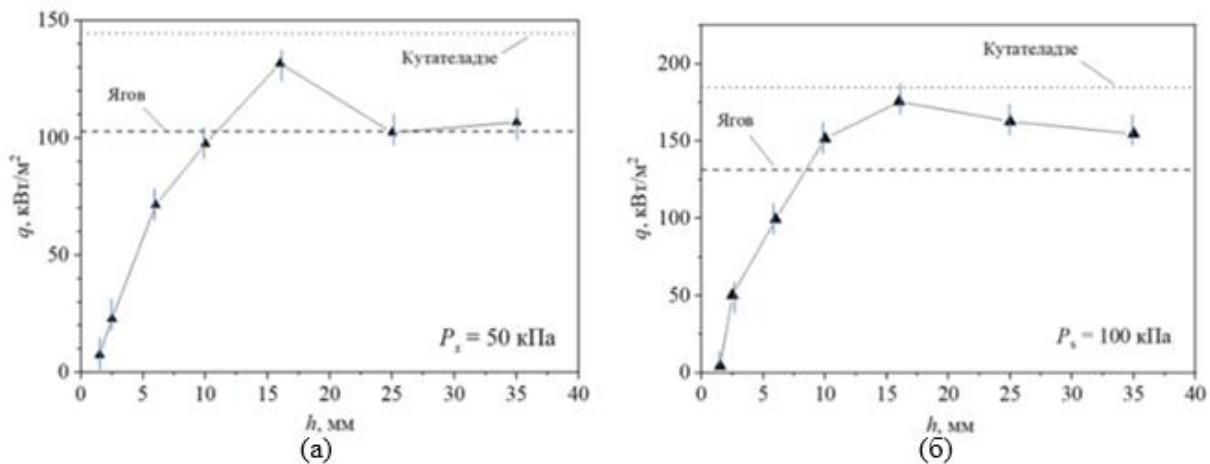


рис.1. Влияние высоты слоя на величину критических тепловых потоков на гладкой поверхности при различных давлениях: (а) – 100 кПа, (б) – 50 кПа.

Из сравнения данных по величине критических тепловых потоков в слоях жидкости различной высоты следует, что на гладкой поверхности нагрева переход от режимов теплообмена при кипении в тонких слоях жидкости к кипению в большом объеме для HFE–7100 происходит при высоте слоя более 6 мм (более семи капиллярных постоянных). Установлено, что в слоях жидкости высотой 10 мм, 16 мм, 25 мм и 35 мм величину критических тепловых потоков можно оценить по расчетным моделям Кутателадзе (1) и Ягова (2), разработанным для условий кипения в большом объеме жидкости.

Исследования выполнены за счёт средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00245).

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН Павленко А. Н. за вклад в постановку задачи исследования и обсуждение полученных результатов.

Список публикаций:

- [1] Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Shvetsov D.A. The effect of pressure on heat transfer at evaporation/boiling in horizontal liquid layers of various heights on a microstructured surface produced by 3D laser printing // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2023. Vol. 163. P. 120488.
- [2] Кутателадзе С.С. Гидродинамическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // *Журн. техн. физики*. 1950. Т. 20, № 11. С. 1389–1392.
- [3] Yagov V.V. Is a crisis in pool boiling actually a hydrodynamic phenomenon? // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 73. – P. 265–273.

## 20 - Физика и экология. Экологические проблемы в энергетике

Азаров Игорь Сергеевич, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения Павловского района Воронежской области**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [iazarov@sfedu.ru](mailto:iazarov@sfedu.ru) стр. 336

Белицкая Софья Сергеевна, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Радиационный фон на Нововоронежской АЭС**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [belitskaya.2301@bk.ru](mailto:belitskaya.2301@bk.ru) стр. 336

Дубров Никита Иванович, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Дозовые нагрузки на открытых территориях и в помещениях Октябрьского района Ростовской области**  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
e-mail: [nikita.dubrov@bk.ru](mailto:nikita.dubrov@bk.ru) стр. 337

Качусов Даниил Александрович, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Исследование мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) Неклиновского района Ростовской области**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [daniil.kachusov@yandex.ru](mailto:daniil.kachusov@yandex.ru) стр. 339

Кузнецова Ксения Александровна, 4 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в городах и сельских поселениях с развитой угольной промышленностью**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [ksenya.tony.lol@gmail.com](mailto:ksenya.tony.lol@gmail.com) стр. 340

Лукашов Даниил Романович, 1 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Гамма-фон в городе Азове Ростовской области**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [buraeva\\_elen@mail.ru](mailto:buraeva_elen@mail.ru) стр. 341

Сайфуудинов Тимур Каноатшохович, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Удельная активность искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [tima.saufydionv2001@gmail.com](mailto:tima.saufydionv2001@gmail.com) стр. 342

Шаповалов Егор Сергеевич, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, НИИ физики  
**Распределение удельной активности естественных  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и искусственного  $^{137}\text{Cs}$  радионуклидов на территории Алексеево-Лозовского сельского поселения**  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
e-mail: [yegor.shapovalov.01@mail.ru](mailto:yegor.shapovalov.01@mail.ru) стр. 343

## **Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на территории Павловского района Воронежской области**

**Азаров Игорь Сергеевич**

*Бобылев Вячеслав Александрович*

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.*

*[iazarov@sfedu.ru](mailto:iazarov@sfedu.ru)*

Радиационная безопасность человека и окружающей среды – одна из наиболее важных проблем нашего времени, связанная с воздействием источников ионизирующего излучения на экосистемы и население Земли. В свете расширения ядерной энергетики, медицинского применения радиации и других источников излучения крайне важно проводить всестороннее изучение этой проблемы и разрабатывать меры по обеспечению радиационной безопасности. Независимо от типа предприятия – атомная электростанция, или участок хранения радиоактивных отходов, или обычное предприятие, а также прилегающие к ним населенные пункты – необходимо осуществлять мониторинг уровня гамма-излучения на открытых территориях.

Целью данного исследования является изучение распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в приземном слое воздуха в городе Павловск и в населенных пунктах Павловского района Воронежской области.

В данной работе представлено исследование распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения с использованием методов пешеходной гамма-съемки и последующим анализом полученных данных. Мониторинг проводился в следующих населенных пунктах: город Павловск, село Александровка-Донская, село Гаврильск, село Петровка, село Русская Буйловка, село Воронцовка, село Николаевка, село Большая Казинка, село Заосередные Сады, село Лосево. Для измерений мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) использовался поисковый дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДКС-96с. Полученные данные были обработаны и проанализированы с использованием программных средств, таких как Microsoft Office и Origin.

В работе показано, что мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в зонах наблюдения варьирует в пределах: для города Павловска – от 0,01 мкЗв/час до 0,44 мкЗв/час, средняя арифметическая МЭД – 0,15 мкЗв/час; для сельских поселений Павловского района минимальное значение составило 0,01 мкЗв/час, максимальное – 0,34 мкЗв/час, средняя арифметическая МЭД – 0,13 мкЗв/час. Все полученные значения соответствуют Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009).

В целом, средняя арифметическая мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в сельских поселениях Павловского района ниже, чем в г. Павловск, что, может объясняться наличием в городе Павловске асфальтобетонных заводов, комбината по добыче и переработке гранита, более высокой загруженностью автомобильным транспортом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

## **Радиационный фон на Нововоронежской АЭС**

**Белицкая Софья Сергеевна**

*Южный федеральный университет*

*Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.*

*[belitskaia@sfedu.ru](mailto:belitskaia@sfedu.ru)*

Все страны мира проводят непрерывный мониторинг радиационной обстановки. Измерение мощности эквивалентной дозы (МЭД) позволяет контролировать использование атомной энергии и оценивать уровень радиоактивного загрязнения в различных областях мира. Поэтому сотрудники АЭС в городе Нововоронеж постоянно контролируют уровень гамма-излучения, чтобы обеспечить жителям города и соседних поселений защиту от воздействия радиации.

Целью данного исследования является установить особенности распределения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в приземной атмосфере города Нововоронеж и зоны наблюдения Нововоронежской АЭС.

К зоне наблюдения Нововоронежской АЭС относятся такие поселения как: с. Аношкино, х. Осинки, х. Михайловка, п. Колодезный, с. Архангельское, х. Пашенково. Измерения проводились на открытых территориях методом пешеходной гамма-съёмки при помощи дозиметра-радиометра ДКГ-РМ1621А. Данные по гамма-фону были обработаны и анализированы с использованием программных платформ MsOffice, Origin и Statistica.

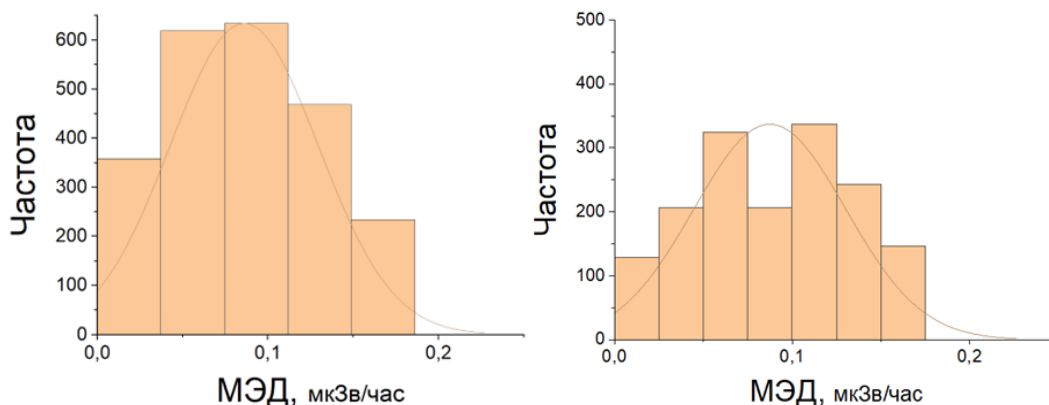


рис.1. Распределение МЭД на открытой территории а) г. Нововоронеж; б) в зоне наблюдения Нововоронежской АЭС

Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на территории города Нововоронеж и зоны наблюдения Нововоронежской АЭС варьируется от 0,01 мЗв/час до 0,16 мЗв/час со средним значением 0,08 мЗв/час (рис. 1). Средняя годовая эффективная доза на открытых территориях составляет 0,14 мЗв. Полученные значения согласуются с Нормами Радиационной Безопасности (НРБ-99/2009) и с данными, полученными НПО «Тайфун» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

## Дозовые нагрузки на открытых территориях и в помещениях Октябрьского района Ростовской области.

**Дубров Никита Иванович**  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, к.х.н.  
[nikita.dubrov@bk.ru](mailto:nikita.dubrov@bk.ru)

В крупных городах с плотной застройкой и большим населением систематически проводится мониторинг экологического и радиационного состояния окружающей среды. Однако исследования радиационной обстановки в сельской местности, где расположены электростанции и другие предприятия, практически отсутствуют.

Вокруг Новочеркасской ГРЭС расположены три населенных пункта. Поселения имеют разные типы жилых домов, близлежащие предприятия, пахотные поля. Станицы Кривянская и Заплавская-Бессергеновская по большей части состоят из домов коттеджного и дачного типа. Посёлок Донской полностью состоит из домов, построенных из кирпича или железобетонных панелей. Отопление в домах централизованное (подаётся от Новочеркасской ГРЭС) или индивидуальное газовое. Большинство дорог поселений имеют асфальтовое покрытие. Также к Новочеркасской ГРЭС подходят подводящий и сбросной каналы, которые не являются природными сооружениями, однако могут значительно повлиять на окружающую среду.

Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) измерялся методом пешеходной гамма-съёмки с использованием стандартных методик дозиметрического контроля и дозиметров-радиометров. Удельная активность радионуклидов в почвах определялась гамма-спектрометрическим методом. Объёмная активность радона измерялась методом пассивной сорбции [1-7]. Средние годовые эффективные дозы от природных источников ионизирующих излучений на открытых территориях и в помещениях Октябрьского района Ростовской области представлены на таблице:

Доза, мЗв/г	Открытые территории	Помещения
$H_{\gamma}$	0,17	0,90
$H_{NR}$	0,06	-//-
$H_{Cs}$	0,01	-//-
$H_{Rn}$	-//-	0,04
$\Sigma$	0,24	0,94

Где  $H_{\gamma}$  – Годовая эффективная доза гамма-излучения;  $H_{NR}$  – Годовая эффективная доза естественных радионуклидов;  $H_{Cs}$  – Годовая эффективная доза искусственных радионуклидов;  $H_{Rn}$  – Годовая эффективная доза  $^{222}\text{Rn}$  в помещениях;  $\Sigma$  – Годовая эффективная доза на открытых территориях и в помещениях.

В целом, гамма-фон, удельная активность радионуклидов в почвах в исследуемых населенных пунктах характерны для Ростовской области и согласуется с Нормами радиационной безопасности [8-12]. Различия в уровнях МЭД и в содержании почвенных радионуклидов могут быть обусловлены влиянием Новочеркасской ГРЭС, строительных материалов, близостью пахотных полей и др.

Полученные в данной работе результаты оценки дозовых нагрузок на население Октябрьского района Ростовской области, показывают, что годовые эффективные дозы от природных источников ионизирующих излучений не превышают Нормы радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009) и обусловлены инфраструктурой, крупными предприятиями, сельским хозяйством.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

- [1]. МВК 2.2.3(50)-11 Методика дозиметрического контроля территории на участках застройки // РнД: типография ЮФУ, 2011. 15с.
- [2]. МУ 2.6.2398-08 Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности // М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 27с.
- [3]. МВК 5.6(38)-11 Методика дозиметрического контроля объектов, содержащих ЕРН // Ростов-на-Дону: типография ЮФУ, 2011. – 13с.
- [4]. ГКПС 14. 00.00.000 ПС. Дозиметр-радиометр ДРБП-03 с блоками детектирования БДГ-01 и БДБА-02. Паспорт (Техническое описание, инструкция по эксплуатации, формуляр).
- [5]. ЖШП.289.386 ПС Прибор геологоразведочный сцинтилляционный СРП-88Н. Паспорт.
- [6]. ТУ 9442-003-13286222-03. "Комплекс измерительный для мониторинга радона «КАМЕРА-01». Технические условия."
- [7]. ФВКМ.412131.002-03РЭ Гамма-спектрометр сцинтилляционный «Прогресс-гамма»;
- [8]. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) // Министерство юстиции Российской Федерации. 2009.
- [9]. СанПиН 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // Министерство юстиции Российской Федерации. 2010.
- [10]. UNSCEAR 2000. Report to the General Assembly, with Scientific Annex G. Biological effects at low radiation doses. United Nations. New York, 2000; 73-175.
- [11]. UNSCEAR 1993. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. Annex F. Influence of dose and dose rate on stochastic effects of radiation. United Nations. New York, 1993; 619-727.
- [12]. МР 2.6.1.0063-12 Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии // М.: Государственное санитарно эпидемиологическое нормирование Российской Федерации, 2012. – 14–15 с.

## Исследование мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в Неклиновском районе Ростовской области

Качусов Даниил Александрович  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
[daniil.kachusov@yandex.ru](mailto:daniil.kachusov@yandex.ru)

Исследование мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) в Неклиновском районе Ростовской области представляет собой важный шаг в обеспечении безопасности и благополучия его жителей от воздействия природных источников ионизирующего излучения [1,2]. Осуществление мониторинга радиационной обстановки в этом регионе является ключевым компонентом общей системы радиационной безопасности.

Климат Неклиновского района – умеренно континентальный, из-за большого количества степей здесь часто бывают сильные ветра [3]. Для данной области характерны восточные, северо-восточные и северные ветра. Особенно эти направления преобладают в период с августа по сентябрь. В этот период открывается «восточный коридор», а вместе с ним приходит очень сухой воздух и минимальное количество осадков. Неклиновский район Ростовской области славится своими детскими оздоровительными центрами и базами отдыха, расположенными на берегу Таганрогского залива Азовского моря. Именно поэтому важно провести всестороннее изучение и анализ МАЭД в данной местности, чтобы обеспечить безопасную среду как для отдыхающих, так и для местного населения.

Цель настоящего исследования заключается в анализе уровня радиоактивности и проведении обширного анализа данных МАЭД, полученных путем пешеходной гамма-съемки в поселениях Неклиновского района Ростовской области. Кроме того, планируется сравнить полученные результаты с допустимыми нормами, установленными в Нормах радиационной безопасности Российской Федерации (НРБ-99/2009) [1].

Исследование мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения было проведено в нескольких населенных пунктах региона, таких как: поселок Вечность, хутор Дарагановка, хутор Герасимовка, хутор Веселый, поселок Дмитриядовка и село Никольское. Каждый из данных населенных пунктов имеет свои особенности [3], что делает полученные результаты более полными и информативными. Для исследования МАЭД на территории Неклиновского района был использован поисковый дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДКС-96с [4], а также стандартные методики дозиметрического контроля [4]. В ходе исследования радиационной обстановки Неклиновского района были получены следующие результаты: мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения на данных территориях варьируется в диапазоне от 0.02 мкЗв/ч до 0.23 мкЗв/ч, при этом среднее арифметическое значение МАЭД по всем жилым поселениям не превышает 0.11 мкЗв/ч (рис. 1).

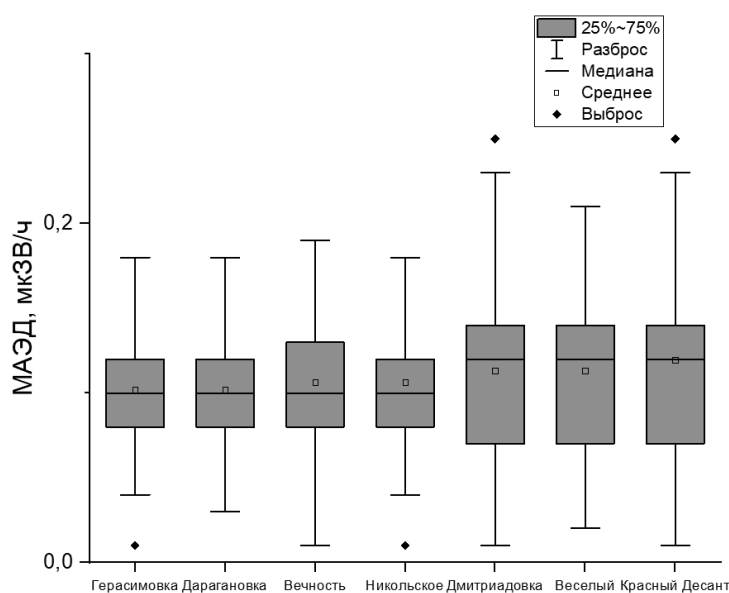


рис. 2. Сравнение МАЭД в населенных пунктах Неклиновского района

При анализе полученных данных из пешеходной гамма-съемки можно сделать выводы о том, что все значения МАЭД не превышают Нормы радиационной безопасности [1,2] и характерны для Ростовской области.



Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

[1] СанПин 2.6.1.2523-09 *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)*. 2009 г.

[2] СП-2.6.1.2612-10. *Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)*: М.: Роспотребнадзор, 2010

[3] Казеев К.Ш., Стрелкова В.И. *Физическая География: Учебник: Ростов-на-Дону 2008 г*

[4] ТЕ1.415313.003РЭ *Дозиметры-радиометры ДКС-96. Паспорт. Руководство по эксплуатации*.

## Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения в городах и сельских поселениях с развитой угольной промышленностью

*Кузнецова Ксения Александровна*  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
[ksenya.tony.lol@gmail.com](mailto:ksenya.tony.lol@gmail.com)

Донецкий угольный бассейн является крупнейшим месторождением каменного угля в Европе. Когда-то на этом месте простиралось море. Прошли тысячелетия и остатки растительности и животного мира превратились в каменный уголь. Благодаря этим месторождениям получил развитие целый регион – Донбасс. Однако на Донбассе существуют острые экологические проблемы. Значительные территории в местах добычи угля заняты терриконами. На Донбассе их более тысячи и почти половина из них – горят, загрязняя окружающую среду различными поллютантами, в том числе и радионуклидами. В связи с этим необходимо проводить регулярный радиоэкологический мониторинг территорий с развитой угольной промышленностью.

Цель работы: определить мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) излучения в приземном слое воздуха на территории городов и сельских поселений (города Новошахтинск, Шахты, Гуково и села Самбек) в пределах Донецкого угольного бассейна (рис.1)

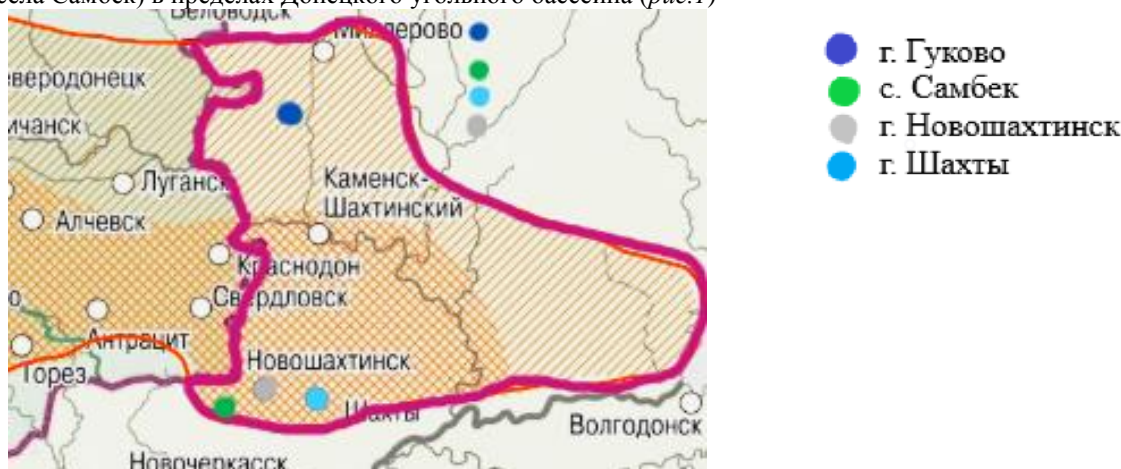


рис.1. Область исследования

Для измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения использовался дозиметр-радиометр ДРБП-03. Гамма-фон в населенных пунктах оценивался методами пешеходной гамма-съемки на высоте 1 метр от поверхности земли.

МАЭД гамма-излучения в городах и сельских поселениях с развитой угольной промышленностью лежит в промежутке от 0,02 мкЗв/час до 0,23 мкЗв/час [1]. Данные уровни МАЭД характерны для Ростовской области и согласуются с гамма-фоном, полученным за пределами Донбасса [2]. Годовая доза в этих населенных пунктах варьируется от 0,17 мЗв/год до 2 мЗв/год, что соответствует НРБ – 99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 (для населения предельное значение мощности эквивалентной дозы излучения не должно превышать 5 мЗв/год)

На территории Донецкого угольного бассейна (города Новошахтинск, Шахты, Гуково и села Самбек) мощность эквивалентной дозы гамма-излучения не превышает значения НРБ – 99/2009 и ОСПОРБ-99/2010, что может говорить о том, что влияние угольной промышленности на годовую дозу, в этих населенных пунктах, незначительно. Стоит отметить, что в районах размещения терриконов, отвалов пород МАЭД может достигать

и превышать 0,3 мкЗв/ч, что требует отдельных исследований как уровней гамма-фона, так и удельной активности радионуклидов в почвах и породах Донбасса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

[1] *Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в городах с развитой угольной промышленностью Ростовской области в 2022 году: свид. о гос. рег. базы данных № 2023621578 / Бураева Е.А. и др.; заявка № 2023621335; заявл. 15.05.2023 г.; дата гос. рег. 18.05.2023 г.*

[2] *Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения Неклиновского района Ростовской области в 2022 году: свид. о гос. рег. базы данных № 2023621602 / Бураева Е.А., и др.; заявка № 2023621333; заявл. 15.05.2023 г.; дата гос. рег. 19.05.2023 г.*

## Гамма-фон в городе Азове Ростовской области

Лукашов Даниил Романович<sup>1</sup>

Шаповалов Егор Сергеевич<sup>2</sup>, Антохина Ксения Витальевна<sup>3</sup>

Южный федеральный университет<sup>1</sup>

Научно-исследовательский институт Южного федерального университета<sup>2</sup>

Государственный университет «Дубна»<sup>3</sup>

Бураева Елена Анатольевна<sup>1,2</sup>, д.б.н.

[daniellukaschov@yandex.ru](mailto:daniellukaschov@yandex.ru)

В современном мире как никогда необходимо следить за радиационной обстановкой. Главная задача отслеживания радиационной обстановки на открытых территориях – обеспечение безопасного проживания населения. Данные мероприятия проводятся с целью предупреждения негативного воздействия ионизирующего излучения – излучения, приводящего к образованию ионов разных знаков. Если ни в одной точке не выявлено превышение гамма-фона, установленного Нормами Российской Федерации, то этот участок считается пригодным для проживания человека и ведению аграрной деятельности. Территории с повышенной мощностью эквивалентной дозы (МЭД) требуют более тщательного изучения, включающего отбор проб почвы, растительности и т.п.

Объектом исследования данной работы является город Азов Ростовской области. Было проведено 544 измерения МЭД. В городе располагаются предприятия лёгкой, пищевой промышленности и машиностроительная отрасль. Также в данном населенном пункте функционирует завод по производству белково-витаминных добавок и оптико-механический завод, выпускающий медицинские приборы, оптические изделия, спектральную и тепловизионную технику, а также крупный речной порт.

Измерения проводились поисковым дозиметром-радиометром ДРБП-03 методом пешеходной гамма-съемки на высоте 100 сантиметров от поверхности земли. по разным районам города, начиная от центра, заканчивая спальными, частными секторами и промышленными районами. Ниже в таблице представлены результаты статистической обработки данных по МЭД города Азова.

Параметры	Значение
Минимум, мкЗв/ч	0,01
Максимум, мкЗв/ч	0,26
Среднее арифметическое, мкЗв/ч	0,10
Среднее геометрическое, мкЗв/ч	0,09
Мода, мкЗв/ч	0,09
Медиана, мкЗв/ч	0,10
Стандартное отклонение, мкЗв/ч	0,04
Коэффициент вариации, %	36,3
Количество измерений, шт	544

Как видно из таблицы, среднее арифметическое, среднее геометрическое значения, мода и медиана МЭД на территориях города Азова Ростовской области совпадают в пределах стандартного отклонения. Широкие

вариации гамма-фона (36,3%) в данном населенном пункте могут быть обусловлены как неоднородностью территорий исследования – чередованием спальных районов, частного сектора и промышленных зон; различным дорожным покрытием (для Азова характерно как асфальтовое покрытие, так и грунтовое в частном секторе), так и использованием разных строительных материалов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

## Удельная активность искусственного $^{137}\text{Cs}$ в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС

*Сайфудинов Тимур Каноатишович*  
Южный федеральный университет

*Бураева Елена Анатольевна, к.б.н.*  
*[tima.saufydionv2001@gmail.com](mailto:tima.saufydionv2001@gmail.com)*

Ежегодный непрерывный контроль искусственного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в объектах окружающей среды в зонах размещения предприятий ядерной топливной энергетики является актуальнейшей задачей не только для надзорных служб, но и для независимых организаций. Также многолетние непрерывные исследования концентрации радионуклидов на одних и тех же контрольных точках могут дать информацию о динамике радионуклидов, как в латеральном, так и радиальном направлениях.

Данная работа посвящена оценке изменения искусственного радиоцезия в верхнем (0–10 см) почвенном слое в пределах 30-километровой зоны наблюдения Ростовской АЭС.

Удельную активность радиоцезия на территориях исследования определяли на контрольных участках (КУ), заложенных в рамках Предпускового мониторинга (определение «Нулевого фона») в 2000 году. Содержание радиоцезия в образцах почвы измеряли гамма-спектрометрическим методом. Использовали стандартные методики подготовки почв. Отбирали почв отбирали с глубины 0–10 см, площадь отбора почвы, в среднем, составляла 10x10 см.

Параметр	Год			
	2000	2016	2018	2019
Минимум, Бк/кг	1,0	0,1	0,9	0,7
Максимум, Бк/кг	156,1	63,2	54,5	55,3
Среднее арифметическое, Бк/кг	28,6	16,4	14,7	14,7
Среднее геометрическое, Бк/кг	20,3	12,4	11,4	12,5
Медиана, Бк/кг	19,0	14,7	11,9	17,6
Мода, Бк/кг	12,3	21,0	5,9	13,4
Стандартная ошибка, Бк/кг	1,6	0,6	0,7	0,6
Стандартное отклонение, Бк/кг	24,9	10,9	10,5	8,3
Количество измерений, шт	253	331	198	193

Вариации радиоцезия (*табл.*) в верхнем слое почвы достаточно значительные. При этом имеет место снижение удельной активности данного радионуклида со временем, обусловленная как его естественным распадом ( $T_{1/2}=30$  лет), так и миграцией по почвенному профилю в связи с чередованием засушливых и дождливых периодов накануне отбора проб почвы, характерных для сухостепных районов Ростовской области. При этом, полученные результаты радиоцезия в почвах зоны наблюдения Ростовской АЭС соответствуют среднемировым значениям удельной активности данного радионуклида и обусловлены выпадениями после аварии на Чернобыльской АЭС.

Основным результатом мониторинговых исследований зоны наблюдения Ростовской АЭС является установление того, что удельная активность радиоцезия за период с 2001 по 2019 годы не превышает данных предпускового мониторинга зоны наблюдения Ростовской АЭС и согласуется с результатами, полученными сторонними исследователями и различными надзорными службами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

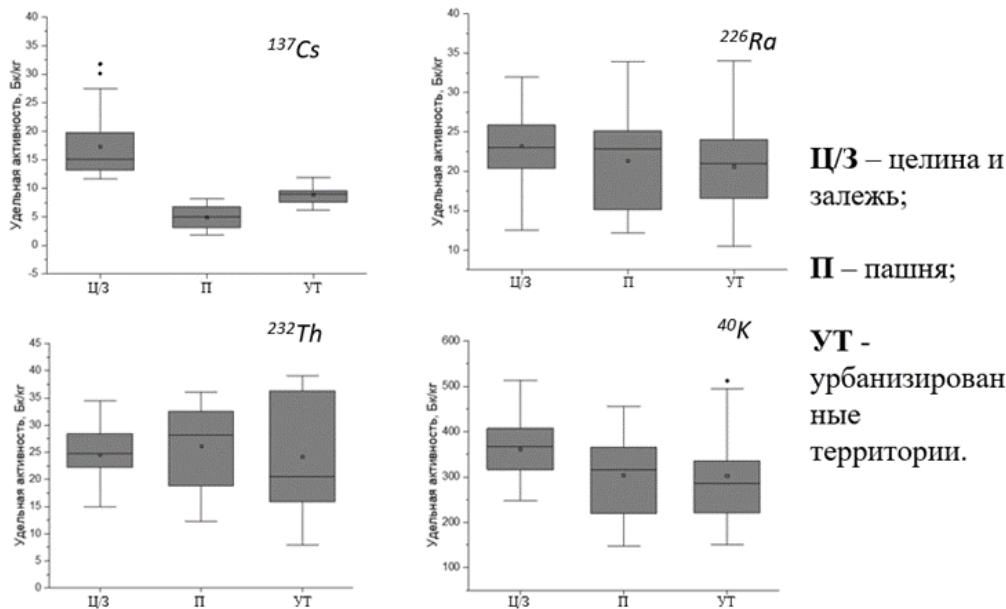
# Распределение удельной активности естественных $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ и искусственного $^{137}\text{Cs}$ радионуклидов на территории Алексеево-Лозовского сельского поселения

*Шапалов Егор Сергеевич*  
Южный федеральный университет  
Бураева Елена Анатольевна, д.б.н.  
[yegor.shapovalov.01@mail.ru](mailto:yegor.shapovalov.01@mail.ru)

Измерение удельной активности радионуклидов в почвах является одним из наиболее важных показателей при оценке радиационной обстановки окружающей среды [1]. Почва является естественным «хранилищем» радионуклидов, которые могут попадать в нее как в результате природных процессов, так и в связи с антропогенной деятельностью человека.

Работа посвящена исследованию радиационной обстановки на территории Алексеево-Лозовского сельского поселения и оценке распределения естественных радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почв.

Объектом исследования является Алексеево-Лозовское сельское поселение Чертковского района Ростовской области. Отбор проводился на участках сельскохозяйственного назначения, целине и частных территориях местных жителей на 14 контрольных участках (КУ). Измерения проводились на сцинтилляционном спектрометре «Прогресс-Гамма», в соответствии со стандартными методиками отбора и подготовки почвенных проб. На *рис. 1* представлено распределение удельной активности естественных и искусственного радионуклидов для каждой группы контрольных участков.



*рис. 1. Распределение удельной активности радионуклидов на различных контрольных участках*

Распределение удельной активности радионуклидов в почвах показало, что для  $^{137}\text{Cs}$  наибольшее среднее значение удельной активности наблюдается на территории непаханных полей (НП). Среднее значение  $^{137}\text{Cs}$  для всех участков составляет 10,5 Бк/кг, согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009), данный уровень не даёт значительного вклада в годовую эффективную дозу, действующую на население и окружающую среду.

Распределение содержания  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  на каждом из участков можно считать равномерным, со средними значениями, составляющими 21,6 Бк/кг и 24,9 Бк/кг соответственно для  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ . Такое сходство концентраций  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$  на КУ может свидетельствовать о том, что сельскохозяйственная деятельность, рекультивация не являются факторами, влияющим на миграцию радионуклидов как по вертикальному, так и по горизонтальному профилю почвы.

Содержание  $^{40}\text{K}$  в почвах каждого участка значительно отличается по абсолютным показателям, и лежит в широком интервале от 138 Бк/кг до 513 Бк/кг, такое различие объясняется тем, что  $^{40}\text{K}$  является одним из наиболее распространённых радионуклидов в природе, поэтому и содержание его в почве значительное.

Важно, что полученные удельные активности в почвах Чертковского района характерны для Ростовской области и не превышают среднемировые значения. Полученные значения удельных активностей не вносят

весомый вклад в годовую эффективную дозу, суммарное значение этого показателя равно 0,05 мЗв, что составляет 1/20 от среднего показателя годовой эффективной дозы для населения (1 мЗв), согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2009) [2,3].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.). Проект № FENW-2023-0010/(Г30110/23-11-ИФ).

Список публикаций:

[1] Gupta M. *Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate in fl y ash samples from a thermal power plant and estimation of radiation doses. Radiation Measurements. 2013. Vol. 50. P. 160–165.*

[2] СанПин 2.6.1.2523–09 *Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г. № 47 с 01 сентября 2009 г.*

[3] «*Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)*»: СП 2.6.1.261210): зарегистрирован 11 августа 2010 г. Регистрационный № 181150: Минюст России, 2010.

## 21 - Проблемы и методологии преподавания физики. История физики и техники

Габидуллина Арина Ринатовна, 3 курс  
Томск, Томский государственный педагогический университет, физико-математический факультет  
**Подготовка учащихся к выполнению экспериментальной части ОГЭ по физике**  
Аржаник Алексей Ремович, к.п.н.  
e-mail: [arinagabidullina3@gmail.com](mailto:arinagabidullina3@gmail.com) стр. 346

Калистратенкова Екатерина Эдуардовна, 3 курс  
Томск, Томский государственный педагогический университет, физико-математический факультет  
**Развитие экспериментальных навыков у младших школьников с помощью цифровой лаборатории «Наураша в стране Наурандии»**  
Аржаник Алексей Ремович, к.п.н.  
e-mail: [kalistratenkova31@gmail.com](mailto:kalistratenkova31@gmail.com) стр. 347

Калуцкий Владислав Всеволодович, 1 курс  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**Лабораторный стенд «Нитяной маятник с изменяющейся длиной подвеса» для изучения законов сохранения энергии.**  
Иванова Ирина Николаевна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [kalutskyVI@yandex.ru](mailto:kalutskyVI@yandex.ru) стр. 348

Лычагова Ольга Викторовна, 4 курс  
Томск, Томский государственный педагогический университет, биолого-химический факультет  
**Разработка методики исследовательской работы методом тонкослойной хроматографии**  
Червонный Михаил Александрович, д.п.н.  
e-mail: [olychagova.2002@mail.ru](mailto:olychagova.2002@mail.ru) стр. 349

Овчаров Игорь Александрович, магистрант 1 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**О просветительском потенциале астрономии**  
Мастропас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [ovcharov.02001@mail.ru](mailto:ovcharov.02001@mail.ru) стр. 350

Федулова Анастасия Романовна, магистрант 2 года обучения  
Ростов-на-Дону, Южный федеральный университет, физический факультет  
**О комплексном подходе к формированию экспериментальных исследовательских компетенций у школьников**  
Мастропас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.  
e-mail: [anastasya.Covaleova2015@yandex.ru](mailto:anastasya.Covaleova2015@yandex.ru) стр. 351

## **Подготовка учащихся к выполнению экспериментальной части ОГЭ по физике**

*Габидуллина Арина Ринатовна*

*Томский государственный педагогический университет*

*Аржаник Алексей Ремович, к.п.н.*

*[arinagabidullina3@gmail.com](mailto:arinagabidullina3@gmail.com)*

Основной государственный экзамен по физике состоит из двух частей: теоретической и экспериментальной. Большинство учителей при подготовке к основному государственному экзамену (ОГЭ) основной упор делают на решение теоретических задач, анализ графиков. С подготовкой к решению экспериментальных задач возникает ряд проблем и главная проблема - это материальное оснащение кабинетов физики.

В настоящее время все школы России должны быть укомплектованы единым оборудованием для проведения ОГЭ. В реальности необходимое оборудование имеет далеко не каждая школа.

На лабораторных работах и на занятиях, посвященных подготовке к ОГЭ в школах ученики проводят необходимые для экзамена эксперименты, но на оборудовании, имеющемся в распоряжении школы. При этом во время экзамена ученик может растеряться увидев незнакомое оборудование. В результате, даже зная физику, оценка за экзамен может быть ниже, чем он того заслуживает.

Создание курса «Подготовка к экспериментальной части ОГЭ по физике» имеет своей целью хотя бы частично решить данную проблему. Центр дополнительного физико-математического и естественнонаучного образования полностью укомплектован стандартным оборудованием для проведения ОГЭ. Здесь школьники могут познакомиться с оборудованием и провести эксперименты в рамках курса «Подготовка к экспериментальной части ОГЭ по физике».

Кроме подготовки к ОГЭ, в Центре проводятся и другие занятия для школьников с 3 класса по 11 класс: занимательная математика, занимательная физика, подготовка к олимпиадам, подготовка к ЕГЭ и ОГЭ, проектный кружок, углубленная математика.

Особенностью центра является то, что многие занятия проводят студенты и, в рамках дополнительного образования, нарабатывают навыки работы с детьми.

Цель курса: подготовка школьников к выполнению экспериментальной части заданий ОГЭ.

Задачи:

- Познакомить школьников со стандартным оборудованием
- Повторить с учащимися основной теоретический материал по разделам: механика, электричество, оптика
- Научить школьников поэтапно выполнять экспериментальные задания
- Снять эмоциональное напряжение школьников перед экзаменами

Курс состоит из четырех занятий: два блока механики, электричество и оптика. Каждое занятие включает в себя лабораторные работы из списка работ на ОГЭ и длится два академических часа. Все обучающиеся работают с отдельными комплектами оборудования. Перед выполнением каждой отдельной работы, учителя вспоминают с учащимися теоретический материал, который необходим для понимания данной работы, и оборудование, используемое в работе. После чего, все ребята начинают выполнять лабораторную работу в соответствии с планом, указанным в ней. Каждый этап выполнения заданий учитель подробно разбирает со школьниками на доске. Если у кого-то возникает вопрос, то его разбирают индивидуально с каждым учеником или вместе со всей аудиторией, если одинаковый вопрос возникает у многих или ученик делает ошибку, которая часто повторяется у других.

В конце курса школьники говорят, что самым сложным блоком для них является оптика. Так как группа набирается из учащихся с разными уровнями подготовки и из разных школ, некоторые из них говорят, что многие эксперименты они не делали в школе или вовсе не встречались с оборудованием.

Надеемся, что данный курс помогал и будет помогать ребятам в сдаче ОГЭ.

## **Развитие экспериментальных навыков у младших школьников с помощью цифровой лаборатории «Наураша в стране Наурандии»**

**Калистратенкова Екатерина Эдуардовна**

*Томский государственный педагогический университет*

*Аржаник Алексей Ремович, к.п.н.*

*[kalistratenkova31@gmail.com](mailto:kalistratenkova31@gmail.com)*

Развитие экспериментальных навыков на уроках физики является одной из ключевых задач в преподавании данного предмета. Эти навыки формируются при проведении лабораторных работ, во внеурочной деятельности в рамках изучения физики. Основы экспериментальных навыков у детей закладываются, начиная с детского сада, в этот период дети учатся наблюдать природные явления, пытаться их объяснить. В дальнейшем, уже в школе ученики начинают проводить элементарные измерения, заниматься исследовательской деятельностью. Но уровень подготовки очень сильно зависит от материальной базы школы, а также от квалификации учителя, его желания и учебной нагрузки.

В Центре дополнительного физико-математического и естественнонаучного образования Томского государственного педагогического университета (ДФМиЕНО ТГПУ) для учащихся, начиная с 5-ого класса студентами физико-математического факультета ТГПУ разработан курс «Занимательная физика», в котором у детей формируются основы экспериментальных навыков. На курсе обучающиеся учатся планировать проводить эксперименты, объяснять физические явления, производить измерения физических величин. Этот курс проходят обучающиеся 5-х классов с разным уровнем подготовки.

Целью данного курса является развитие экспериментальных навыков у младших школьников (5 класс).

Задачи:

1. Ознакомить младших школьников с такими понятиями как: температура, пульс, сила, кислотность, свет, магнитное поле, электричество.
2. Научить проводить эксперименты с помощью цифровой лаборатории «Наураша в стране Наурандии».
3. Проявить интерес к выполнению экспериментов и изучения физики.

В курсе проводится 8 занятий длительностью 1,5 часа. В качестве экспериментальной базы курса выбрана цифровая лаборатория «Наураша в стране Наурандии». Она разработана компанией ООО «Научные Развлечения». В состав комплекта входят: 7 тематических модулей. В состав каждого модуля входят цифровые датчики в виде божьих коровок, методическое пособие, программное обеспечение. Содержание каждого модуля рассчитано для детей с 5 до 12 лет.

В ходе каждого занятия обучающимся в первой половине занятия рассказывается лекционный материал, а именно краткий материал по определенным модулям, а во второй половине – ребята самостоятельно под присмотром преподавателей проводят экспериментальную часть по пройденным темам. В процессе работы учащиеся научатся любознательности и вовлеченности в исследовательский процесс познания окружающего мира за счет игровой формы обратной связи, изучать реальный окружающий мир при помощи цифровых измерений без лишнего погружения в цифровое пространство, самостоятельности, в свободе выбора явлений окружающего мира для изучения и способов их познания, навыкам коммуникации, коллективной работы и работать в команде.

В ходе курса выявляются как положительные аспекты работы с цифровой лабораторией «Наураша в стране Наурандии», так и отрицательные:

Положительные аспекты: младшие школьники погружаются в экспериментальную работу и с интересом проводят различные опыты за счёт ярких датчиков, в ходе эксперимента обучающиеся воспринимают информацию аудиально и визуально.

Отрицательные аспекты: данная лаборатория рассчитана на короткий срок эксплуатации, в следствии этого некоторые компоненты могут сломаться и показывать неверные данные.

В конце каждого курса обучающиеся заполняют анкеты, в которых они указывают на сколько курс был для них полезный, интересный, на сколько он им понравился и научились ли они чему-то новому.

Для студентов курс является хорошей и комфортной практикой, ведь благодаря этому курсу студенты нарабатывают навыки работы с детьми, а также на курс приходят учащиеся с желанием изучать новое и познавать окружающий себя мир.



## Лабораторный стенд "Нитяной маятник с изменяющейся длиной подвеса" для изучения законов сохранения энергии

Калуцкий Владислав

Южный федеральный университет

Иванова Ирина Николаевна

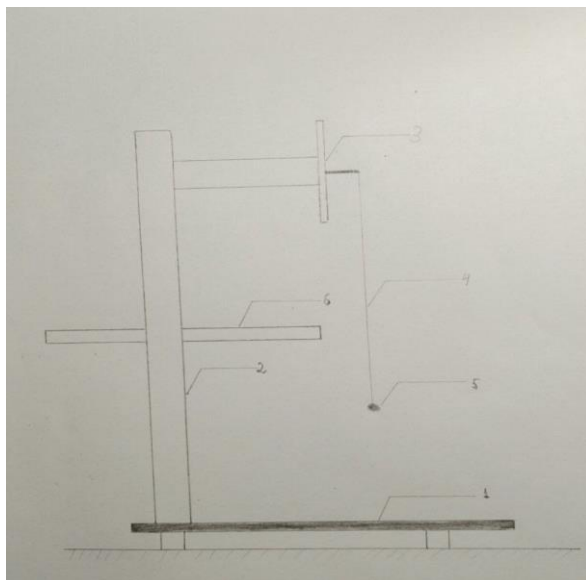
[kalutsky@yandex.ru](mailto:kalutsky@yandex.ru)

Лабораторные работы важны в образовании, поскольку позволяют студентам качественно усваивать различный материал, изучать и применять теоретические знания на практике. В частности, лабораторные работы по физике позволяют демонстрировать и подтверждать различные законы и принципы физики на практике. Лабораторные работы по физике помогают укреплять понимание изучаемых тем. Такой практический опыт не только улучшает академическую успеваемость, но и развивает у студентов навыки критического мышления, анализа данных и решения проблем.

В курсе «Колебания и волны» для демонстрации законов сохранения энергии, плоского и поступательного движения, а так же периодов колебания в качестве демонстрационных стендов используются математические маятники, маятники Максвелла, Ньютона, Обербека. Для дополнительного изучения поведения математических маятников и их колебаний может понадобиться нитяной маятник с изменяющейся длиной подвеса.

Целью данной работы являлась разработка демонстрационного стенда нитяного маятника с изменяющейся длиной подвеса для изучения поведения длины нити и периода колебаний при изменении подвеса во время совершения колебаний.

Демонстрационный стенд «Нитяной маятник с изменяющейся длиной подвеса», представленный на *рис. 1* состоит из реек, листа фанеры, отвеса. Во время выполнения опыта можно заметить, что при отклонении на достаточный угол маятник не продолжит совершать колебания, а начнет закручиваться на ось. Это связано с избыточной потенциальной энергией, которая осталась после уменьшения длины нити. Именно эта энергия дает грузу достаточную скорость, чтобы намотаться на ось, а не продолжить совершать колебания.



*рис.1*

1-Основание, 2-Стойка, 3-Градусная сетка, 4-Нить, 5-Грузик. 6-Выдвижной подвес.

- 1) Отклонить нить с грузиком на выбранный угол, отпустить и зафиксировать наблюдения.
- 2) Выставить выдвижной подвес, отклонить нить с грузиком на тот же угол, отпустить и зафиксировать наблюдения.
- 3) Провести действия (1),(2) для другого угла, затем для другого выдвижного подвеса.
- 4) Обработать замеры.

Методика выполнения работы и контрольные вопросы для студента оформлены в виде инструкции к демонстрационному стенду.

Данная установка была опробована мной и моими одноклассниками. Главными ее преимуществами является надежность и простота конструкции.

Подобные стенды широко используются на физических практикумах, проводимых на технических и естественно-научных факультетах, а также могут применяться в средних общеобразовательных и средне-специальных учебных заведениях при изучении курса «Физика». В дальнейшем планируется разработка стендов для изучения иных видов колебаний, например, электромагнитных.

Список публикаций:

[1] Савельев И. В. "Курс общей физики".

[2] Грабовский М.А., Млодзеевский А.Б., Телеснин Р.В., Шаскольская М.П., Яковлев И.А. "Лекционные демонстрации по физике".

## **Разработка методики исследовательской работы методом тонкослойной хроматографии**

**Лычагова Ольга Викторовна**

*Томский государственный педагогический университет*

*Червонный М.А., д.п.н.; А. Е. Иваницкий А.Е., к.п.н.*

*[olychagova.2002@mail.ru](mailto:olychagova.2002@mail.ru)*

Исследование методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) имеет немаловажное значение в химических и биологических исследованиях по нескольким причинам.

1. Определение компонентов смеси. Метод тонкослойной хроматографии позволяет определить компоненты сложных смесей, а также их концентрации.

2. Очистка и предварительное разделение соединений. ТСХ применяется для очистки и предварительного разделения смесей на отдельные компоненты перед проведением более сложных химических и биологических анализов

3. Контроль качества. Тонкослойная хроматография применяется в фармацевтической и пищевой промышленности, медицине, и других областях для контроля качества продукции и выявления примесей.

4. Исследования в области биохимии: хроматография обширно используется для изучения биологически активных веществ [1, с. 37].

Метод тонкослойной хроматографии является междисциплинарным, стоит на стыке физики и аналитической химии, и интегрирован в государственную программу по созданию в педагогических вузах технопарков универсальных педагогических компетенции.

В послании Федеральному Собранию Российской Федерации от 21 апреля 2021 г. Президент РФ отметил необходимость и важность обновления образовательной инфраструктуры педагогических вузов. В рамках комплексной программы в этом году были выделены средства на создание технопарков универсальных педагогических компетенций в педагогических вузах [2]. Эти центры направлены на проведение междисциплинарных и метапредметных проектов, организацию исследовательской деятельности и формирование функциональной грамотности. По итогам осуществления данной программы в Томском государственном педагогическом университете был основан технопарк, в рамках которого были открыты и функционируют лаборатории конвергентного образования междисциплинарных исследований (МДИ) в области генетики, аналитической химии и физики.

В лаборатории МДИ был установлен комплект оборудования, который отражает взаимосвязь между физикой и химией, а именно «Хроматографические процессы разделения: тонкослойная хроматография (ТСХ)». Однако при подготовке к работе возникли проблемы. Информация о принципе работы была найдена на английском и немецком языках, на сайте производителя. При проведении эксперимента и выполнении заданий на основе переведенных методических описаний, исследовательские возможности работы на установке не проявились в необходимой степени. Возникла проблема касающиеся методического обеспечения, как для преподавателей, так и для студентов. Кроме того, следует принимать во внимание межпредметный характер работы, проводимый в лаборатории исследовательского направления (физика и аналитическая химия), а также возможность проведения исследования не только студентам и преподавателям физико-математического и биолого-химического факультетов, но студентам и педагогам других институтов и факультетов.

Наша задача по разработке учебно-методических материалов для технопарка, вызвала необходимость решения следующих проблем:

1. Осуществление точного контекстного перевода.
2. Анализ и переформатирование полученного методического описания на междисциплинарный уровень.
3. Изменение характера работы с обычного лабораторного эксперимента на исследовательский.
4. Включение заданий, направленных на проведение исследований.
5. Оценка экспериментальной работы с различными группами учащихся и внесение требуемых изменений.

Кратко представим, как были решены третья, четвертая и пятая задачи. Так для установки «Хроматографические процессы разделения: тонкослойная хроматография (ТСХ)» проводится исследование разделения смеси красителей методом тонкослойной хроматографии. В определенных пористых материалах, таких как гель кремния, целлюлоза, полиамиды и другие, растворенные вещества перемещаются с различной скоростью. Из-за данного различия в скоростях, они могут быть отделены от смесей, и при необходимости, подвергнуты дополнительному анализу. Для студентов-педагогов – будущих учителей физики и химии наглядным образом формируется представление о значимости тонкослойной хроматографии, процедуре разделения смеси.

Выводы. Таким образом, в процессе выполнения поставленных целей были разработаны методические материалы для проведения исследовательской работы, объединяющие различные предметы и соответствующих целям лаборатории. Решение данных целей позволяет более ясно представить студентам-педагогам возможности развития у школьников естественно-научной грамотности – способности применять знания на практике для решения повседневных задач в различных областях жизни.

Список публикаций:

1. Пацовский, А. П. *Современные достижения в области тонкослойной хроматографии* // Мир измерений. 2013. №1. С. 36-40.
2. *Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10.07.2021 № 1889-р*  
URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202107130013> (Дата обращения 09.03.2024).

## **О просветительском потенциале астрономии**

***Овчаров Игорь Александрович***

*Южный федеральный университет*

*Мастропас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.*

*ovcharov.02001@mail.ru*

Знания о мире, в котором он живет, любой человек получает не мгновенно и не в готовом виде. Но вера в существование «изначального принципа Платона» с древности до наших дней стимулирует поиски ученых. Для того, чтобы понять природу, у первобытного обывателя не было другого способа, чем уподобить ее живому существу. Это в дальнейшем становится источником и научных знаний, и религиозных фантастических представлений. Явления, которые мы привыкли называть небесными, например, происходят независимо от наших знаний о них. Информация об этих явлениях нынче широко представлена в интернет пространстве. Но отсутствие базовой астрономической грамотности приводит к тому, что человек часто не в состоянии правильно сориентироваться в потоке слухов и бредовых мифов о «творце» природы, жизни внеземных цивилизаций, строении и эволюции Вселенной. Просветительский потенциал астрономии как раз в том, чтобы помочь распознать ложные сведения и отделить их от реальности окружающего мира. Элементов астрономического образования, имеющихся в программах основной и средней общеобразовательных школ, к сожалению, явно недостаточно. Тем более, что в последние десятилетия астрономия, как автономный учебный предмет, то появлялась в качестве обязательных, то исключалась из их числа.

Справиться с возникшей проблемой призвана помочь организация просветительской и воспитательной работы по астрономии на площадках обсерваторий. Особенно важна, на наш взгляд, кружковая работа, где может быть легко реализована связь астрономии с другими предметами естественнонаучного цикла. В астрономических исследованиях практически отсутствует возможность проведения натуральных экспериментов с изучаемым объектом. Мы можем только наблюдать за ним, а за некоторыми, как известно, и не со всех сторон. При этом варианты реализации законов физики, например, в космическом пространстве гораздо более многочисленны, чем на Земле. Поэтому выводы о природе тех или иных объектов Вселенной, правильная картина какого-либо астрономического явления складывается из отдельных умозаключений, вытекающих из физических законов. Хорошо, когда материально-техническая база обсерватории позволяет организовывать не только простые наблюдения звездного неба. Тогда появляется возможность планирования временных

исследований за небесными объектами, активного участия в научно-исследовательской деятельности. Донская астрономическая учебная обсерватория С-80 Южного федерального университета (ЮФУ) как раз и представляет собой такую многопрофильную площадку для проведения просветительской деятельности по астрономии. Двери обсерватории открыты и для разовых экскурсий школьников города и области (а также их родителей), и для учебных занятий и практик студентов. В распоряжении обсерватории имеется телескопная техника, позволяющая проводить и научные исследования по астрономии и астрофизике (телескоп системы Шмидт-Кассегрен MEADE 16"/4).

Кружковая работа при обсерватории организована для смешанных возрастных групп любителей астрономии (младшие школьники, старшеклассники, студенты, аспиранты, возрастное население прилегающих к обсерватории территорий). Исследования организуются при помощи преподавателей физического факультета ЮФУ, студентов и аспирантов, бывших кружковцев – ныне занимающихся научными астрономическими исследованиями. Программы кружков составлены таким образом, чтобы к работе можно было подключиться на любом ее этапе наблюдательно любого возраста. Например, для младших кружковцев ставятся посильные задачи при наблюдении видимых движений небесных объектов, наблюдений Луны и Солнца: 1) отыскать Полярную звезду или созвездие Кассиопеи, проследить за перемещением какой-либо яркой звезды или группы звезд в течение вечера наблюдений; 2) пронаблюдать и отметить высоту полной Луны в момент кульминации, отождествить по картам наиболее заметные «моря», кратеры, горные вершины Луны; 3) измерить диаметр солнечного диска, измерить число пятен. Для тех, кто уже не является новичком, задачи усложняются: 1) пронаблюдать фазы Венеры, найти и зарисовать созвездия, в которых находится одна из внешних планет, повторив зарисовки через неделю; 2) при наблюдении метеоров оценить продолжительность полета, оценить угловую длину пути и яркость.

Наличие соответствующего программного обеспечения позволяет автоматизировать процессы наблюдения, ставить для «продвинутых» кружковцев задачи исследовательского типа. Примером такой задачи может быть наблюдение астероидов. Процесс начинается с привязки системного времени компьютера ко всемирному времени, далее телескоп с помощью программы PHD2Guiding автоматически наводится на координаты астероида и следит за ним, связанная астрокамера делает снимки через заданные промежутки времени. Для каждого астероида процедура повторяется 60-90 раз. Полученные кадры калибруются в программе TsuchiTracker и оформляются отчеты, содержащие полную информацию о наблюдаемом астероиде. Такая работа выполняется кружковцами, в том числе, и по заказам научно-исследовательских учреждений.

Все результаты наблюдений регулярно обсуждаются на общих собраниях, докладываются на школьных конференциях, используются при проведении популярных лекций для населения. В настоящее время мы разрабатываем методическое сопровождение для проведения на базе обсерватории летних астрономических школ для учащихся города и области.

Список публикаций:

[1] <https://don24.ru/rubric/mesta/lohmotya-v-kosmose-v-rostove-zasekli-kak-durackaya-kometa-priblizhaetsya-k-zemle-na-ogromnoy-skorosti.html>

[2] <https://don24.ru/rubric/obschestvo/20-maya-mezhdunarodnyy-den-kosmosa.html>

[3] <https://don24.ru/rubric/obschestvo/uchenyy-iz-rostova-rabotaet-s-omikronom-kotoryy-ne-sposoben-nikogo-zarazit.html>

## **О комплексном подходе к формированию экспериментальных исследовательских компетенций у школьников**

**Федулова Анастасия Романовна**

*Южный федеральный университет*

*Мастерпас Зинаида Петровна, к.ф.-м.н.*

[anastasya.Covaleova2015@yandex.ru](mailto:anastasya.Covaleova2015@yandex.ru)

Формирование экспериментальных исследовательских компетенций у подростков – одно из требований к уровню подготовки выпускников в федеральном компоненте стандарта среднего (полного) общего образования. Необходимость обеспечения технологического суверенитета страны ставит задачу поиска новых эффективных методов и технологий организации обучения предметам естественно-научного цикла. В последние годы педагоги и методисты неоднократно указывают на очень низкую мотивацию школьников к изучению физики [1]. Для решения этой проблемы все шире используется привлечение детей к участию в работе инженерно-технических школ и разного рода проектных смен, где они получают и совершенствуют навыки экспериментальной исследовательской деятельности. Это позволяет надеяться на то, что в дальнейшем школьники будут заниматься самостоятельным конструированием и творческим изобретательством. Основные

элементы экспериментальных умений (и организационные, и технические, и интеллектуальные, и конструкторские) в полной мере могут быть сформированы и на уроках физики. Основой развития школьного физического эксперимента при этом становится такая его организация, при которой школьники могут получить и новые познавательные результаты, и могут оценить свои способности и возможности.

Организация такой комплексной экспериментальной деятельности школьников, конечно, требует больших трудозатрат учителя. При планировании занятий учителю необходимо сначала самому определить, какие элементы экспериментальных исследований и в каком виде могут составить необходимый комплекс. В информационном пространстве на данный момент доступно обширное количество методических рекомендаций по изучению основных понятий. Но, в основном, они связаны с методикой использования отдельных видов экспериментальной деятельности: это или подборка фронтальных опытов, или рекомендации по домашнему эксперименту, реже описаны комплекты заданий «демонстрационные опыты – фронтальный эксперимент», «домашний эксперимент – лабораторные работы» и т.п.. Ранее мы также подбирали комплекты, включающие фронтальный и домашний эксперимент, и апробировали их во время педагогических практик в разных вариациях [2]. Анализ такой работы показал, что наибольший обучающий эффект достигается только в том случае, если изучаемый на уроке материал многократно в разных аспектах воспроизводится школьниками в процессе экспериментов, проводимых ими непосредственно. То есть, наиболее целесообразно использование логически связанных циклов таких экспериментов по каждому из основных понятий (демонстрационный эксперимент – фронтальные опыты – домашний эксперимент (проект) – лабораторная работа – демонстрационный эксперимент). Поэтому мы продолжили работу по составлению многокомпонентных комплектов с описанием методики их использования.

Например, при изучении темы «Световые явления» на уроках физики в основной школе учащиеся знакомятся с явлениями, практическое использование которых они наблюдают ежедневно. Особенно важно научное объяснение этих явлений в доступной форме. Конечно, учитель может использовать стандартную схему изучения законов отражения и преломления света во время демонстрационного эксперимента. Однако, использование только демонстрационного эксперимента, пусть даже очень зрелищного и привлекательного, не исключает определенного формализма в знаниях. И необходимо построение дополнительных «мостиков», которые можно перебросить от экспериментов в классе к тем явлениям окружающей действительности, которые изученными законами объясняются. Поэтому при изучении законов преломления лучше сначала для постановки проблемы провести фронтальный опыт «сломанный карандаш», тогда демонстрационный эксперимент станет обоснованной стадией изучения явления. Далее практическое использование законов преломления школьники могут исследовать в процессе выполнения домашнего эксперимента. Идея такого эксперимента должна быть увлекательна для них. Например, можно поставить задачу самостоятельной проверки одного из сюжетов романа Жюль Верна о путешествиях и приключениях капитана Гаттераса: сделать водоналивную или ледяную линзы. При этом школьникам придется самостоятельно проектировать эксперимент, выяснять и описывать условия его проведения, анализировать полученные результаты, фиксировать их с помощью доступных цифровых технологий. Цепочка таких экспериментальных исследований может замыкаться при выполнении лабораторной работы «Получение изображения при помощи линзы». В отчет по выполнению работы учитель может включить и вопросы, ответы на которые школьники уже нашли в процессе домашнего экспериментирования. Таким образом, формирование представлений о явлении преломления света происходит постепенно во время комплексных самостоятельных исследований трех разных типов. Это обеспечит и прочные знания, и появление новых экспериментальных умений и навыков.

При изучении способов и закономерностей передачи тепла подобные тройки экспериментальных работ можно реализовывать для каждого вида теплопередачи. Так, при изучении конвекции для постановки проблемы учитель предлагает школьникам провести фронтальный опыт по сравнению скорости перемешивания воды в двух случаях: 1) холодная вода наливается в горячую; 2) горячая вода наливается в холодную. В качестве домашнего предлагается эксперимент по быстрому охлаждению содержимого кастрюли двумя способами: 1) кастрюлю ставят на лед; 2) лед кладут на крышку кастрюли. Необходимо описать, какой способ оказался эффективнее и объяснить почему. Наконец, для систематизации полученных знаний проводится лабораторная работа «Сравнение количеств теплоты при смешивании воды разной температуры»

Для учителя необходимы методические разработки, в которых будут описаны комплекты экспериментальных работ разного типа с методическими рекомендациями по их выполнению и использованию при изучении практически всех основных понятий школьного курса физики. В настоящее время мы завершаем разработку таких рекомендаций по курсу физики основной школы. Считаем актуальной работу по созданию аналогичного методического обеспечения и для курсов физики старшей школы.

Список публикаций:

[1]. Федюнина Н.Ф. *Повышение мотивации учащихся к изучению физики // Физика. Все для учителя. №4(64), апрель 2016, С.4-8.*

[2]. Ковалева А.Р., Матропас З.П. *Эксперименты в школе и дома // Сборник тезисов. Материалы двадцать седьмой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-27), Екатеринбург, С. 322.*

## Школьная секция. Список докладов

**Бусыгин Михаил Юрьевич**, 9 класс

*Заривный Владислав*

Красноурьинск, Центр детского творчества, технический отдел

**Программируемый калькулятор своими руками**

Мурзина Татьяна Анатольевна, педагог высшей категории

e-mail: [Tatyana\\_murz@mail.ru](mailto:Tatyana_murz@mail.ru)

**Валеев Радий Сергеевич**, 8 класс

Красноурьинск, Центр детского творчества, технический отдел

**Новые технологии и природа. Использование грибов слизевиков при строительстве автомагистралей**

Мурзина Татьяна Анатольевна, педагог высшей категории

**Гордиенко Андрей Дмитриевич**, 10 класс

*Эйрих Дмитрий, Чекушкин Ярослав, Резвухин Максим, Паздников Иван*

Красноурьинск, Центр детского творчества, технический отдел

**Макеты перекрестков города Красноурьинска, предназначенные для проведения окружного конкурса по ПДД**

Мурзина Татьяна Анатольевна, педагог высшей категории

**Заривный Владислав Валерьевич**, 9 класс

*Бусыгин Михаил, Паздников Иван*

Красноурьинск, Центр детского творчества, технический отдел

**Паркинг будущего**

Мурзина Татьяна Анатольевна, педагог высшей категории

**Мурзина Елена Сергеевна**, 6 класс

Красноурьинск, Центр детского творчества, технический отдел

**Создание станка для плетения фенечек**

Мурзина Татьяна Анатольевна, педагог высшей категории

### Демонстрационные модели и проекты от участников из Клуба юных техников Академгородка

**Макк Артур**, 10 класс

Новосибирск, Академгородок, Клуб юных техников

**Модель шагающего экскаватора**

**Михайлов Андрей**, 10 класс

Новосибирск, Академгородок, Клуб юных техников

**Музыкальный инструмент из бутылки**

**Мельников Иван**, 10 класс

Новосибирск, Академгородок, Клуб юных техников

**Электродвигатель. Тахометр**

**Муштаков Александр**, 8 класс

Новосибирск, Академгородок, Клуб юных техников

**Изготовление действующей модели аэросаней**

**Французов Андрей**, 10 класс

Новосибирск, Академгородок, Клуб юных техников

**Педаль Fuzz**

**Герасимова Лидия**, 10 класс

Новосибирск, Академгородок, Клуб юных техников

**Проектирование и изготовление машинки на радиоуправлении и использованием современных технологий**

## Алфавитный указатель

Абакумова В. А. ....	36	Денисюк М. И. ....	309	Лагунов Д. А. ....	38
Азаров И. С. ....	336	Деринг Е. Д. ....	325	Латыпова А. Р. ....	87
Акинина М. Д. ....	201	Джантемиров А. Х. ....	56	Ли Ч. ....	88
Алимов Д. В. ....	173	Диденко Е. А. ....	250	Логинов М. В. ....	109
Алмаев Д. А. ....	79	Дирко В. В. ....	83	Лотов И. К. ....	110
Амонский Д. С. ....	270	Дмитриев В. О. ....	58	Лукашов Д. Р. ....	341
Антохина К. В. ....	174	Донских К. Г. ....	251	Лычагова О. В. ....	349
Арсентьев С. С. ....	139	Друженков А. В. ....	281	Макаров П. А. ....	151
Арсентьев С. С. ....	138	Дружинин А. В. ....	252	Максименкова М. А. ....	62
Артишевский К. В. ....	247	Дубров Н. И. ....	337	Малецкий А. В. ....	255
Астафьев П. А. ....	48	Дьячков С. А. ....	105	Манегин Д. С. ....	111
Астахов Д. С. ....	175	Евдокимов А. А. ....	106	Марков Е. И. ....	257
Асылкаев А. М. ....	305	Евсеев Г. С. ....	181	Марков И. Ю. ....	129
Афаунов Р. Э. ....	176	Егорова В. М. ....	219	Мартынченко А. А. ....	63
Ба М. ....	271	Есин Е. С. ....	84	Мельников С. А. ....	89
Бабинович А. Е. ....	140	Жуйков Д. А. ....	205	Мещерякова В. А. ....	207
Бакина К. А. ....	141	Зайцев О. В. ....	327	Миназов И. И. ....	284
Бармин Н. М. ....	273	Звалинская А. П. ....	220	Мирошниченко С. А. ....	208
Барышников В. М. ....	306	Земцов Р. А. ....	98	Мойса М. О. ....	64
Беликов Ю. А. ....	177	Зубарев И. Б. ....	99	Мошиченко С. Д. ....	286
Белицкая С. С. ....	336	Зубрилин А. А. ....	58	Мукминова Р. Р. ....	65
Бердникова А. С. ....	233	Зуев В. О. ....	310	Назаров С. В. ....	196
Бетке И. А. ....	247	Ибрагимов А. Р. ....	117	Назаров А. Д. ....	209
Бетлени П. И. ....	142	Иванов А. Е. ....	107	Назаров Р. Х. ....	152
Биганяков А. А. ....	234	Иванов С. О. ....	119	Недоедкова О. В. ....	66
Билюкова М. Р. ....	228	Иванов С. В. ....	117	Никифоров Я. А. ....	258
Бобылев В. А. ....	80	Ивашева Е. Е. ....	120	Николайчук И. Ю. ....	312
Богомолова А. И. ....	248	Ивченко И. Д. ....	148	Новиков М. В. ....	184
Богословцева А. Л. ....	249	Ильясова Г. Ф. ....	122	Носова Н. М. ....	67
Боронин В. А. ....	143	Ильяшенко А. В. ....	236	Нуриахметов З. Н. ....	260
Брущенко А. И. ....	145	Исламов Д. Р. ....	85	Овчаров И. А. ....	350
Букин С. П. ....	275	Калистратенкова Е. Э. ....	347	Огурцов Е. С. ....	287
Валиулина Л. И. ....	178	Калуцкий В. В. ....	348	Орехова С. М. ....	211
Васильев В. ....	81	Каргина А. М. ....	328	Орехова С. М. ....	210
Вахрушев А. А. ....	307	Карева К. В. ....	123	Осинных И. В. ....	90
Вергасова С. А. ....	179	Каушан П. С. ....	229	Павленко М. А. ....	288
Веселова Е. Ю. ....	216	Кафаров Р. Г. ....	124	Пандов Д. Д. ....	289
Виноградова Е. В. ....	276	Качусов Д. А. ....	339	Параскун А. Г. ....	113
Войлошников А. Д. ....	145	Коваленко Д. А. ....	253	Пархоменко М. С. ....	313
Вопиловский А. М. ....	49	Ковальчук Т. Н. ....	237	Петров П. К. ....	39
Габидулина А. Р. ....	346	Козлова К. С. ....	168	Петрова О. В. ....	154
Гаврилова А. М. ....	37	Козонов А. Ю. ....	126	Петухова В. В. ....	314
Гавриляк А. М. ....	51	Кокоренко А. А. ....	182	Подшивалов А. П. ....	69
Гаппель Е. В. ....	147	Кокотов Д. Г. ....	254	Полянский Д. А. ....	316
Гареев Р. Р. ....	235	Комлина С. В. ....	255	Полянский Д. А. ....	315
Гареев Т. И. ....	324	Кондратьева Э. Р. ....	222	Попов М. Д. ....	291
Гвоздиков Е. В. ....	52	Коноплев А. А. ....	282	Прилуцкая А. А. ....	169
Гисматулин А. А. ....	82	Корж В. А. ....	108	Рудая Я. Е. ....	239
Глазунова Е. В. ....	54	Коробко К. В. ....	60	Рутковский В. О. ....	155
Голубовский М. П. ....	194	Косырев Л. Н. ....	128	Рыгина М. Е. ....	261
Горбачев Н. В. ....	278	Кочкин А. С. ....	61	Саблин М. С. ....	292
Грабовой А. С. ....	202	Кривцов В. Г. ....	283	Сабурова В. С. ....	294
Грапенко О. Ю. ....	180	Куделя С. А. ....	100	Савинов Д. С. ....	212
Гриздодуб А. Н. ....	279	Кудряшова С. А. ....	238	Садыков Р. Р. ....	295
Гурбангелдиев Д. А. ....	217	Кузнецова К. А. ....	340	Сайфуудинов Т. К. ....	342
Гусейнова А. Ф. ....	55	Кузьминов Д. А. ....	149	Самигуллина А. И. ....	70
Двойнишников С. В. ....	308	Кукенов О. И. ....	86	Сафин Р. Р. ....	184
Демкин О. В. ....	203	Кунина Е. И. ....	206	Сафиуллин А. Р. ....	240
		Кутергин Д. Д. ....	101	Свирков А. С. ....	262
		Кутилов И. И. ....	283	Семенова А. А. ....	213

Сенкевич К. С. ....	317	Торопова Е. С. ....	133	Чэн Ю. . ....	160
Сердюк А. А. ....	130	Трофимов М. С. ....	94	Шалеев А. В. ....	319
Сидько С. С. ....	156	Тютерева Ю. Е. ....	187	Шаповалов Е. С. ....	343
Скандаков Р. Н. ....	157	Уварова В. А. ....	297	Шагохин М. В. ....	224
Скорупин А. И. ....	329	Фаттахов С. Р. ....	242	Шебелева А. А. ....	42
Смирнова О. О. ....	91	Федулова А. Р. ....	351	Шевченко А. К. ....	301
Солнышкина О. А. ....	241	Филипченко Е. С. ....	298	Шепелин А. В. ....	197
Соловова Н. Ю. ....	71	Фроловский Д. В. ....	40	Ширяева А. А. ....	190
Соловьев Н. Н. ....	92	Хайрулин А. Р. ....	332	Шишлов И. В. ....	74
Сорокин Д. В. ....	263	Хамуд Г. А. ....	157	Щербак В. В. ....	170
Сотникова А. С. ....	93	Харипова Д. И. ....	42	Юсупова Р. М. ....	43
Степаненков А. С. ....	318	Хилько Н. Г. ....	73	Юшков И. Д. ....	95
Суворова Е. В. ....	264	Худякова Ю. В. ....	159	Яковлев Л. А. ....	162
Сыроварова К. А. ....	132	Цай И. Е. ....	188	Янина И. Ю. ....	163
Таможникова В. С. ....	186	Царенко А. В. ....	265	Ярцева М. А. ....	320
Тимофеев В. С. ....	72	Чемичев Д. Г. ....	333		
Тинтулова М. В. ....	330	Черкасов П. В. ....	299		
Токарев А. Ю. ....	114	Четвериков А. О. ....	189		

## МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ ВНКСФ-28 И ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Ответственный за выпуск: Арапов А.Г.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных диапозитивов.

Подписано в печать 20 апреля 2024 г.

Формат 60x84 1/8 Офсетная печать

Ую-изд.л. Тираж 200 экз.